PLANO DE MANEJO DA ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL DAS DUNAS DE PARACURU

Diagnóstico sobre o Avanço do Campo Dunar

Secretário do Turismo
Arialdo de Mello Pinho
Secretário do Meio Ambiente
Artur José Vieira Bruno

Secretário Executivo
Fernando Bezerra

Secretária de Planejamento e Gestão Interna
Maria Dias Cavalcante

Coordenadora da Coordenadoria de Biodiversidade
Dóris Day Santos da Silva

Instituição Contratante:
Secretaria do Turismo do Estado do Ceará
Unidade de Gerenciamento de Projeto (UGP/PROINFTUR): Luiz Mauro Aragão Rosa

Instituição Executora:
Greentec Consultoria e Planejamento Ltda

Responsáveis Técnicos:
Eng. Florestal Eduardo Riberio Felizola – CREA/DF: 8.763/D
Eng. Florestal Rogério Henrique Vereza de Azevedo – CREA/DF: 10.570/D
Geógrafo Mailton Nogueira da Rocha
Eng. Ambiental Arthur Cavalcante Rocha

Comissão de Acompanhamento (SEMA):
Matheus Fernandes Martins (Gestor da UC e Coordenador da Comissão)
Leonardo Almeida Borralho
Tatianna Karinne Angelo Ferreira
Pedro Victor Moreira Cunha

Apoio (SEMA):
Roberta da Rocha Miranda
Rafaela Antunes de Queiroz
Kelven Pinheiro de Sousa

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Praias localizadas a leste (barlamar) e noroeste (sotamar) do pontal de Paracuru. 7

Figura 2 B*ypass* eólico sob o promontório de Paracuru. 8

Figura 3 Modelo transpasse sedimentar em pontais litorâneos. 9

Figura 4 Estágios de vulnerabilidade ambiental mediante a eficácia da gestão territorial. 10

Figura 5 Mapa de classificação do grau de vulnerabilidade ambiental na APA das Dunas de Paracuru. 14

Figura 6 Distribuição mensal da precipitação e da velocidade média dos ventos em Paracuru. 17

Figura 7 Direção predominante dos ventos incidentes em Paracuru e a dispersão por quadrante. 18

Figura 8 Mapa de orientação cartográfica da direção predominante dos ventos incidentes na planície costeira do município de Paracuru. 19

Figura 9 Relação entre velocidade de vento e migração da duna do Pico Alto em 2015. 20

Figura 10 Vetores de bordejo indicando deslocamento da duna do Pico Alto em 2015. A) primeiro semestre. B) segundo semestre. 21

Figura 11 Relação entre a carga sedimentar eólica e a velocidade média dos ventos nas dunas de *bypass*. 22

Figura 12 Sedimentos eólicos transportados por avalanche e depositados na faixa de praia. 23

Figura 13 Sedimentos eólicos transportados e distribuídos ao longo da faixa de praia. 24

Figura 14 Estágios morfológicos em trechos da Praia do Canto e Praia das Almas. 25

Figura 15 Interação entre os sistemas duna e praia com base na análise estatística dos grãos sedimentares. A) março/2015. B) junho/2015. C) setembro/2015. 27

Figura 16 Análise temporal da expansão urbana do município de Paracuru entre os anos de 2004 e 2020. 29

Figura 17 Registro espacial do avanço dos campos de dunas móveis na planície costeira de Paracuru entre os anos de 2004 e 2020. 31

Figura 18 Representação esquemática do cálculo de taxa de avanço dunar pelo método da regressão linear (LRR). 32

Figura 19 Representação setorial das frentes de avanço dunar. Legenda: A - Dunas Boca do Poço e Pico Alto; B - Estrada da Petrobrás; C - Lagoa Grande; D - Mocó; E - Campo Semente; F – Contato com tabuleiro (trecho oeste acima, trecho leste abaixo). 33

Figura 20 Taxas de avanço dos campos de dunas móveis na planície costeira de Paracuru entre os anos de 2004 e 2020. 35

Figura 21 Detalhamento das taxas de migração dunar por setores. Legenda: A - Dunas Boca do Poço e Pico Alto; B - Estrada da Petrobrás; C - Lagoa Grande; D - Mocó; E -

Campo Semente; F - Contato com tabuleiro (trecho oeste acima, trecho leste abaixo). 36

Figura 22 Prognóstico de avanço dos campos de dunas móveis de Paracuru com base na modelagem para os próximos 10 e 20 anos. 38

Figura 23 Detalhamento da taxa de avanço dunar. Legenda: A - Dunas Boca do Poço e Pico Alto; B - Estrada da Petrobrás; C - Lagoa Grande; D - Mocó; E - Campo Semente; F - Contato com tabuleiro (trecho oeste acima, trecho leste abaixo). 39

Figura 24 Áreas prioritárias contenção do avanço dunar na APA das Dunas de Paracuru. 42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1Classificação da vulnerabilidade ambiental para as dunas no município de Paracuru. 12

Tabela 2 Descrição da dinâmica predominante em cada ambiente e as formas de uso antrópico na APA das Dunas de Paracuru. 15

Tabela 3 Descrição das imagens orbitais utilizadas na análise vetorial da migração dunar.....30

SUMÁRIO

1 – APRESENTAÇÃO 6
1.1 Introdução 6
1.2 Objetivos 6
1.3 Caracterização Geográfica do Promontório de Paracuru 6
2 – ÍNDICE DE VULNERABILIDADE 10
2.1. Introdução 10
2.2. Objetivos 11
2.3. Material e Métodos 11
2.4. Resultados e Discussão 12
2.5. Conclusão 15
3 – AVALIAÇÃO DA DINÂMICA DUNAR 16
3.1 Cálculo das taxas de transporte sedimentar e migração eólica das dunas de *bypass* 16
3.1.1 Parâmetros Meteorológicos Atuantes na Migração das Dunas de Paracuru 16
3.1.2 Precipitação e Velocidade Média dos Ventos 16
3.1.3 Direção de Incidência dos Ventos 17
3.1.4. Velocidade Anual de Migração das Dunas 19
3.1.5. Taxas de Transporte Sedimentar (Carga Eólica) 21
3.2 Avaliação da dinâmica entre os sistemas duna e praia no controle sedimentar local 23
3.3 Avaliação do comportamento morfodinâmico das praias com base nos mecanismos hidrodinâmicos e eólicos de transferência 24
3.4 Prognóstico da migração dos campos de dunas da APA das Dunas de Paracuru 28
4 – ESTRATÉGIAS DE INTERVENÇÃO 40
4.1. Definição das ações de contenção e reordenamento territorial 40
4.2. Definição das áreas prioritárias para contenção do avanço do campo dunar 41
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 43

1 – APRESENTAÇÃO

1.1 Introdução

A dinâmica eólica das dunas descrita a seguir tomou como base estudos acadêmicos realizados ao longo da planície costeira do município de Paracuru nos últimos 20 anos, bem como reuniu outras publicações para dar suporte a este relatório. Neste sentido, o presente diagnóstico integra estudos do meio físico (aspectos geológicos, hidroclimáticos, geomorfológicos e pedológicos) correlacionando-os com a dinâmica socioeconômica do município, tendo em vista a necessidade de caracterizar as formas de uso e ocupação no entorno da área de interesse do trabalho. O conhecimento produzido auxilia no planejamento ambiental e indica as intervenções mais adequadas no ambiente.

Os tópicos e subtópicos aqui apresentados dão a dimensão não apenas do transporte eólico e da velocidade de migração das dunas, mas permitem contextualizar a dinâmica sedimentar presente no litoral de Paracuru.

1.2 Objetivos

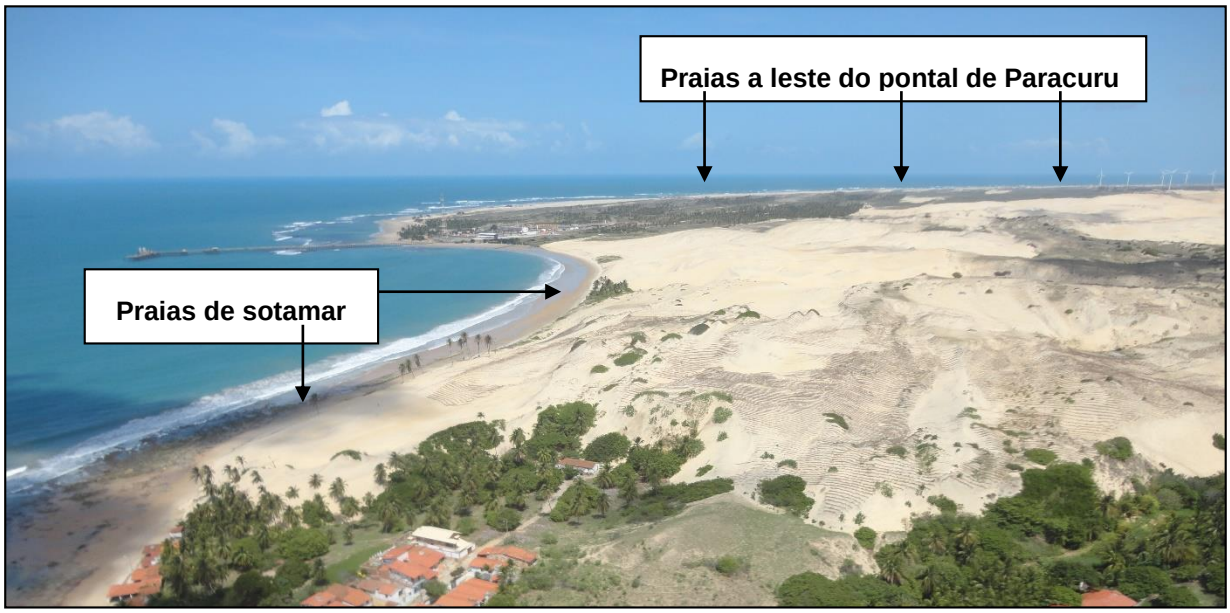
- Classificar o índice de vulnerabilidade ambiental na APA das Dunas de Paracuru;
- Avaliar a dinâmica eólica das dunas móveis e sua interação com o ambiente praial;
- Estabelecer áreas prioritárias para contenção e reordenamento territorial;
- Elaborar Projeto Executivo de contenção do avanço do campo dunar;

1.3 Caracterização Geográfica do Promontório de Paracuru

Os promontórios (também conhecidos como pontais litorâneos) são extensões do continente que se projetam para o oceano. Claudino-Sales e Carvalho (2014) identificaram 33 pontais no litoral do Estado do Ceará, nos quais as dinâmicas litorânea e climática do quaternário conferiram aporte sedimentar para formação de expressivos campos de dunas verificados ao longo da costa.

No que concerne aos processos costeiros, os promontórios influenciam na hidrodinâmica marinha que por sua vez condiciona a morfodinâmica nas praias de barlamar e sotamar. Em Paracuru, as praias situadas a leste do pontal (barlamar) apresentam tendência de acumulação sedimentar em contrapartida, as praias localizadas na porção noroeste (sotamar) indicam tendência erosiva (figura 1).

Figura 1 Praias localizadas a leste (barlamar) e noroeste (sotamar) do pontal de Paracuru.



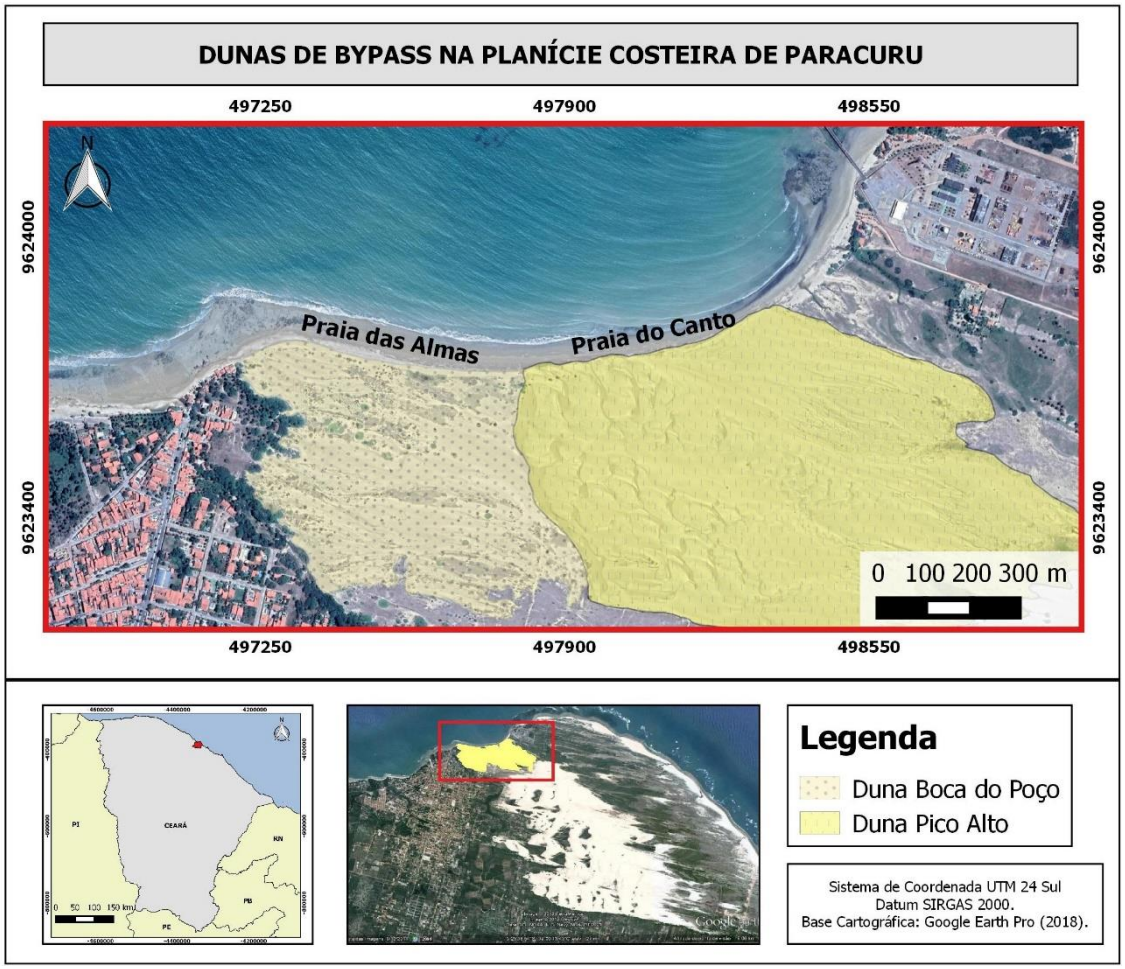
Fonte: Rocha (2017).

O modelo descrito por Yasso (1965) demonstra que o comportamento hidrodinâmico é influenciado pela configuração da linha de costa. A interceptação pelo promontório gera difração e refração de ondas nas praias a sotamar, faz com que as ondas difratadas e refratadas atuem na morfodinâmica das praias a sotamar, originando uma fisiografia curva (como é possível verificar nas praias do Canto e das Almas em Paracuru).

Os pontais atuam como barreira natural acumulando sedimentos transportados em deriva litorânea. Em condições de nível marinho baixo, estes estoques sedimentares (uma vez expostos) são transportados pelo vento em direção ao continente formando os campos de dunas.

O deslocamento de dunas sobre promontórios pode gerar o transpasse das areias eólicas para o sistema de deriva costeira, quando a migração atinge o mar. A reintrodução dos sedimentos no transporte longitudinal origina as zonas classificadas por Tinley (1985) como *headland bypass dune field* (também conhecidas por zonas de *bypass)*. A figura 2 mostra as dunas atuantes no transpasse sedimentar no município de Paracuru.

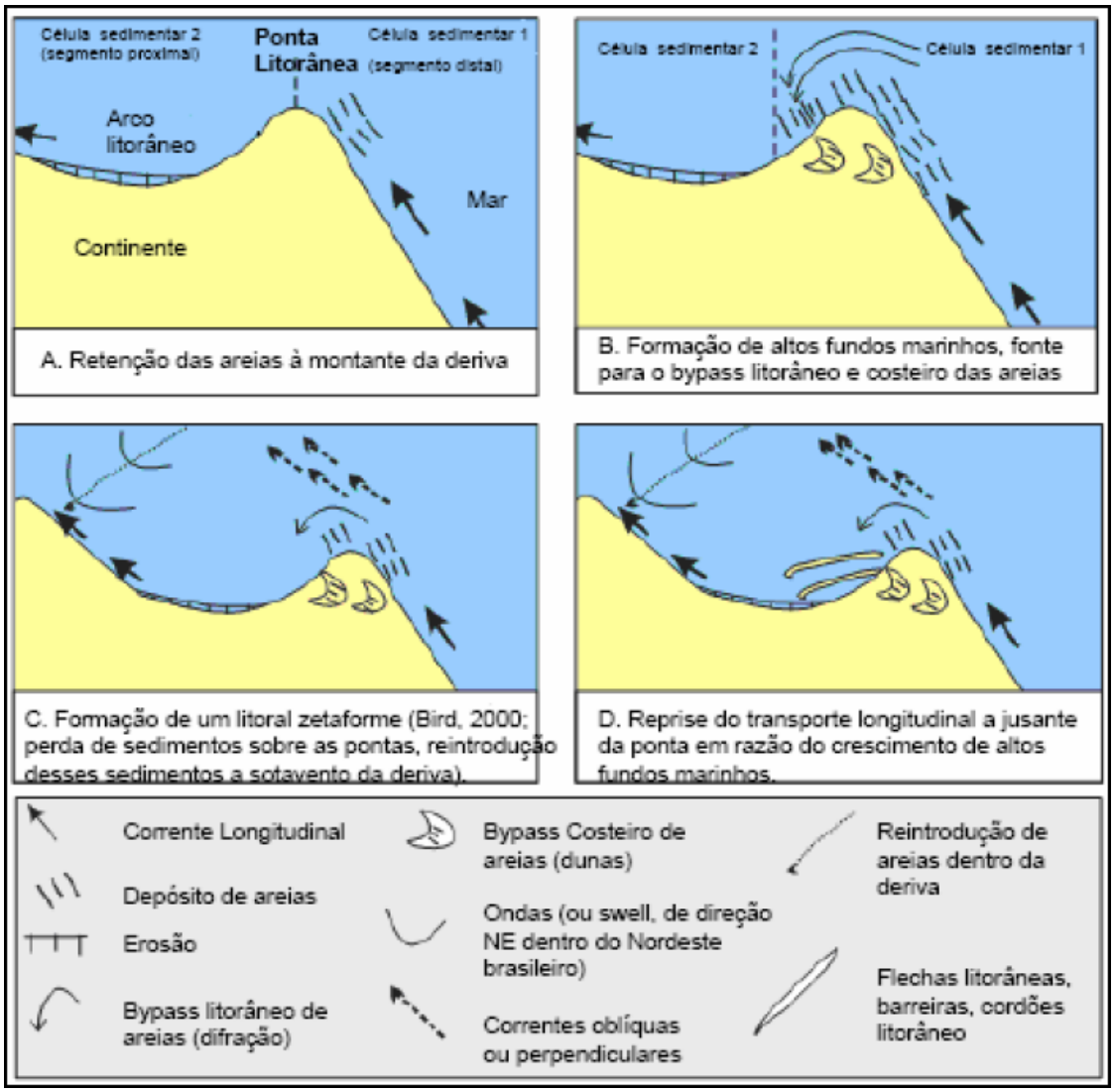
Figura 2 B*ypass* eólico sob o promontório de Paracuru.



Fonte: Rocha (2017).

Este modelo de transpasse sedimentar eólico sobre promontório se aplica aos campos de dunas do trecho noroeste do pontal de Paracuru. A configuração da costa permite a migração eólica dos sedimentos das praias a barlavento (leste do pontal) para formação dos campos de dunas, que por sua vez, transpassam o continente e retornam ao oceano. A figura 3 descreve como ocorre o transpasse sedimentar em pontais litorâneos.

Figura 3 Modelo transpasse sedimentar em pontais litorâneos.



Fonte: Pinheiro (2009).

Convém salientar que formas de uso e ocupação mal implementadas nos ambientes de praia e dunas podem alterar o equilíbrio costeiro nas áreas controladas por promontórios, sobretudo no que diz respeito à distribuição sedimentar nas zonas de *bypass*.

A influência dos promontórios na hidrodinâmica marinha e na distribuição sedimentar nos ambientes praial e dunares é bastante conhecida na literatura, cabendo destacar trabalhos como Carvalho, Maia e Dominguez (2007); Klein *et al* (2010); Boeyinga *et al* (2010); Silveira, Klein e Tessler (2010); Silva, Mousavi e Jose (2012); Magalhães (2015) e Claudino-Sales, Wang e Carvalho (2018).

2 – ÍNDICE DE VULNERABILIDADE

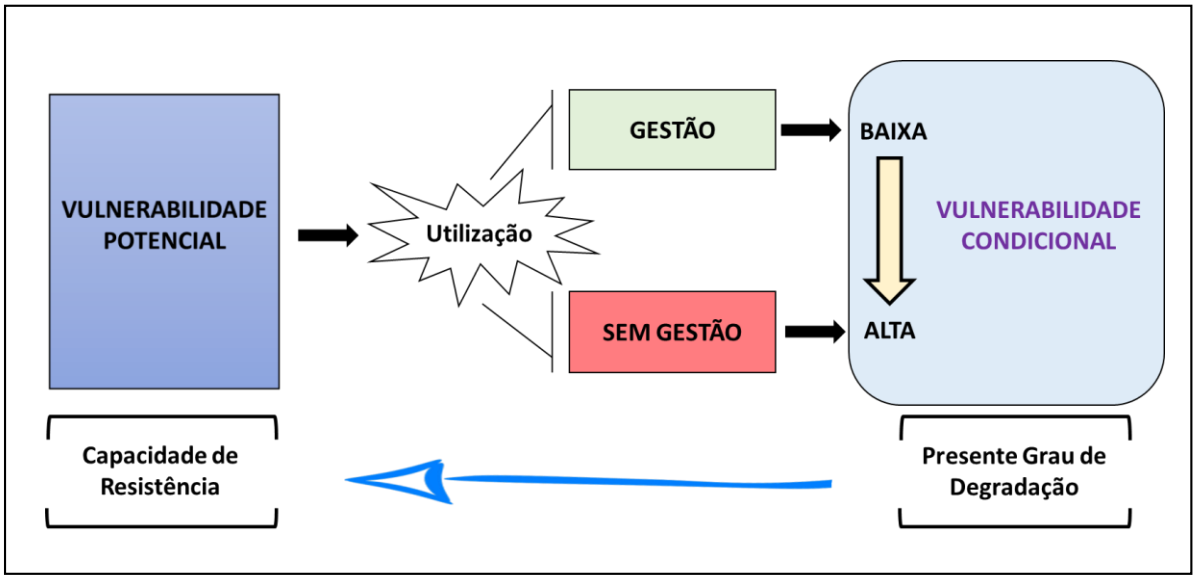
2.1. Introdução

A avaliação do índice de vulnerabilidade ambiental para dunas costeiras é dada a partir da análise de geoindicadores (condições geológicas, hidroclimáticas, geomorfológicas e marinhas) associados às interferências humanas no ambiente. Portanto, quanto mais alto o índice de vulnerabilidade mais difícil é a recomposição das características naturais de uma área, destacam Garcia-Mora *et al.* (2001) e Martinez *et al.* (2006).

As políticas públicas de gerenciamento no litoral devem conduzir e abalizar os diversos atores, muitas vezes com interesses conflitantes. Davies *et al* (1995) publicaram um estudo conceitual no qual abordam critérios e estratégias que subsidiam a gestão de dunas costeiras.

Os autores enfatizam a importância de reconhecer o caráter dinâmico das dunas na avaliação da sua vulnerabilidade. Portanto, esta abordagem não pode ser estática, deve considerar a interação das variáveis objetivas (parâmetros meteorológicos, fisiográficos e morfodinâmicos) com as variáveis subjetivas (definidas como aspectos socioeconômicos e culturais). A figura 4 indica os possíveis cenários de vulnerabilidade ambiental.

Figura 4 Estágios de vulnerabilidade ambiental mediante a eficácia da gestão territorial.



Fonte: Davies et al (1995)

A **vulnerabilidade potencial** é determinada por parâmetros que constituem o ambiente físico, ou seja, os geoindicadores. O **grau de vulnerabilidade condicional** (baixo ou alto) será definido mediante ao nível das políticas públicas de gestão, face as formas de uso e ocupação implementados no ambiente. Quando a gestão é eficaz o **grau de degradação** ambiental é menor. Em contrapartida, na ausência de políticas públicas ou numa gestão descompassada, o grau de degradação é maior (implicando diretamente na **capacidade de resistência** do ambiente).

2.2. Objetivos

- Avaliar o índice de vulnerabilidade ambiental para o sistema eólico na planície costeira de Paracuru;
- Classificar e mapear o grau de vulnerabilidade ambiental na APA das Dunas de Paracuru;
- Identificar as dinâmicas predominantes em cada ambiente, bem como as formas de uso e ocupação implementados na APA;

2.3. Material e Métodos

Para o cálculo do índice de vulnerabilidade ambiental foram utilizados diferentes parâmetros qualitativos, dentre eles: configuração da linha de costa, dinâmica dunar em promontórios, parâmetros meteorológicos, hidrodinâmica marinha, morfodinâmica praial, parâmetros sedimentares e granulométricos e formas de uso e ocupação desenvolvidas na área.

Analisando a vulnerabilidade em campos de dunas na planície costeira de Paracuru, Barbosa (2008) avaliou 5 variáveis que permitiram classificar os sistemas eólicos quanto ao grau de baixa vulnerabilidade (<0,25), moderada (0,25 a 0,5), alta (0,5 a 0,6) e muito alta (>0,6). Os indicadores levaram em consideração variáveis de ordem natural e antrópica, sendo elas: morfometria, morfodinâmica, substrato e tipo de dunas, fisiografia costeira atual, parâmetros climático-oceanográficos e atividades humanas desenvolvidas no meio. O cálculo do índice de vulnerabilidade foi expresso na equação abaixo:

$$\mathbf{IV = (M + D + STD + FCO + AH)/5}$$

Onde:

IV – Índice de Vulnerabilidade

M – Morfometria

D – Morfodinâmica

STD – Substrato e Tipo de Duna

FCO – Fisiografia Costeira Atual e Parâmetros Climático-Oceanográficos

AH – Atividades Humanas

Para fins de produção cartográfica, este estudo correlacionou o cálculo do índice de vulnerabilidade proposto por Barbosa (2008) com a classificação do uso e ocupação do solo, obtida através do sensoriamento remoto e de visitas a campo, para identificação do grau de vulnerabilidade ambiental.

Para tanto, foi realizada a classificação supervisionada com base na assinatura espectral das classes amostrais (pixels) de uma imagem do satélite *Planet* datada do ano de 2020, conforme (ESRI, 2021).

O refinamento e calibração dos dados foram feitos através da fotointerpretação, de forma a corrigir inconsistências do algoritmo e adequá-los à escala de trabalho, e através de visitas a campo, para filtragem e suavização das informações a fim de se obter um resultado consistente para o uso e ocupação na APA das Dunas de Paracuru.

2.4. Resultados e Discussão

A vulnerabilidade ambiental pode ser definida, segundo Davies *et al* (1995), como a susceptibilidade de uma área aos processos erosivos e/ou à degradação do ecossistema, face a fatores de ordem natural e humana. Portanto, a identificação do grau de vulnerabilidade e o mapeamento cartográfico tornam-se ferramentas fundamentais para o planejamento territorial.

Segundo resultados em Barbosa (2008), a dinâmica eólica das dunas de Paracuru, associada a fatores morfológicos (fisiografia da costa), oceanográficos (hidrodinâmica marinha) e antrópicos (uso e ocupação), conferem grau de vulnerabilidade ambiental variando entre alto e muito alto, conforme mostra a tabela 1.

Tabela 1Classificação da vulnerabilidade ambiental para as dunas no município de Paracuru.

Variável dunar considerada	Índice de vulnerabilidade	Grau
Morfometria	0,58	Alto
Dinâmica Eólica	0,66	Muito Alto
Substrato e Tipo de Dunas	0,59	Alto
Fisiografia Costeira e Parâmetros Oceanográficos e Climáticos	0,61	Muito Alto
Atividades Humanas	0,64	Muito Alto

Fonte: Barbosa (2008).

Os campos de dunas de Paracuru, ressalta a autora, são caracterizados pelo trânsito de sedimentos eólicos (*bypass*) entre os sistemas duna e praia, ao passo que a migração dunar tem provocado o soterramento de equipamentos urbanos no município.

Associada à dinâmica eólica, as formas de uso e ocupação decorrente das atividades humanas dentro e no entorno da APA das Dunas de Paracuru potencializam o grau de vulnerabilidade do ambiente.

A aplicação do método de classificação apontou que o potencial de alteração ambiental está principalmente relacionado com processos naturais. Contudo, as atividades humanas são relevantes como controles sobre as modificações ambientais registradas. Portanto, a análise da vulnerabilidade ambiental deve ser considerada tanto no gerenciamento costeiro quanto no planejamento das ações a serem implementadas no litoral.

A figura 5 apresenta o mapa de classificação do grau de vulnerabilidade da APA das Dunas de Paracuru considerando, além dos ambientes dunares caracterizados por Barbosa (2008), a faixa de praia, superfície de deflação eólica e tabuleiro.

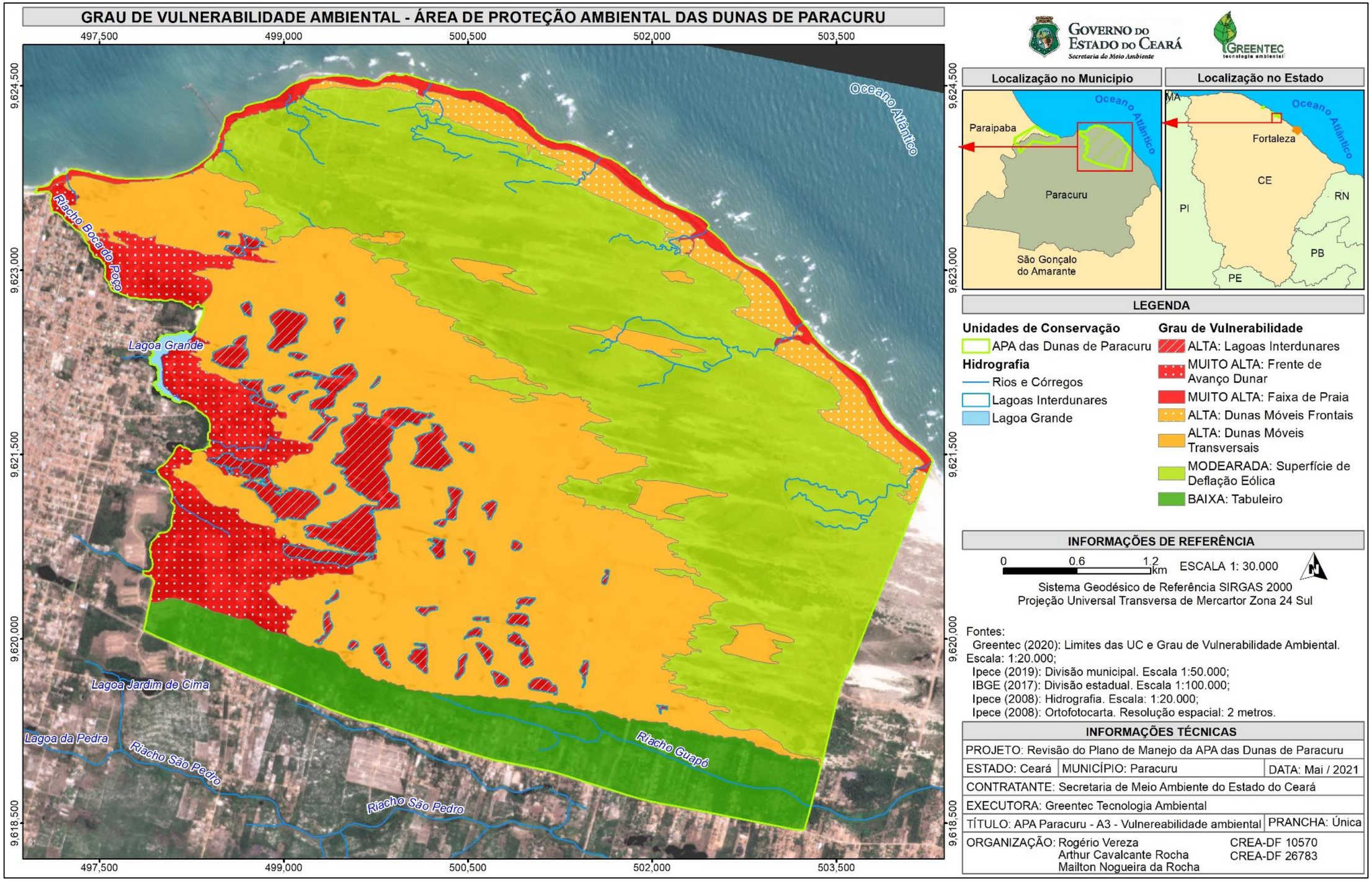
Para tanto, foram incluídas na análise da vulnerabilidade da APA as variáveis da pedogênese e cobertura vegetal, tendo em vista o papel que exercem na configuração dos ambientes de biostasia, descritos por Tricart (1977) no estudo sobre ecodinâmica das paisagens. Desta forma, as áreas correspondentes ao tabuleiro e à superfície de deflação eólica foram classificadas no mapeamento como ambientes de vulnerabilidade baixa e moderada, respectivamente.

Estes setores são considerados relativamente estáveis do ponto da análise morfodinâmica, cuja cobertura vegetal presente tem se tornado condição eficaz dificultando o desencadeamento dos processos mecânicos da morfogênese.

Outro ambiente acrescentado ao mapa da figura 5 corresponde às lagoas interdunares, cujo grau de vulnerabilidade está correlacionado à variável climática, portanto muito alto. A presença desses corpos hídricos está diretamente ligada à sazonalidade anual da quadra chuvosa local.

As informações referentes à dinâmica predominante em cada ambiente mapeado e às formas de uso antrópico na APA das Dunas de Paracuru estão descritas na tabela 2.

Figura 5 Mapa de classificação do grau de vulnerabilidade ambiental na APA das Dunas de Paracuru.



Fonte: Greentec (2021).

Tabela 2 Descrição da dinâmica predominante em cada ambiente e as formas de uso antrópico na APA das Dunas de Paracuru.

Ambiente	Dinâmica predominante	Atividades humanas	Grau de vulnerabilidade
Faixa de praia	Hidrodinâmica marinha e eólica	Turismo e balneabilidade; Translado de veículos automotores; Descarte irregular de lixo;	Muito Alto
Frentes de avanço dunar	Sedimentação eólica Assoreamento de recursos hídricos (Lagoa Grande)	Residências e equipamentos urbanos; Abastecimento hídrico;	Muito Alto
Dunas móveis frontais	Eólica	Turismo e balneabilidade; Barracas de praia;	Alto
Dunas móveis transversais	Eólica	Turismo e balneabilidade; Sandboard; Translado de veículos automotores; Usina eólica; Colocação de palhas de coqueiro;	Alto
Superfície de deflação eólica	Eólica e pedogênese	Rodovia pavimentada; Pecuária e pastagem; Empreendimentos turísticos; Atividade portuária;	Moderado
Tabuleiro	Pedogênese	Ocupação residencial; Estradas de acesso; Agricultura;	Baixo
Lagoas Interdunares	Climática	Turismo e balneabilidade; Kitesurf;	Muito Alto

Fonte: Greentec (2021).

2.5. Conclusão

Uma gestão territorial bem-sucedida requer um planejamento eficaz, com estratégias que reconheçam o conjunto de processos naturais e humanos que atuam dentro de um ambiente. Portanto, esta abordagem sistemática foi aplicada na identificação do grau de vulnerabilidade da APA das Dunas de Paracuru.

A identificação da dinâmica natural predominante em cada ambiente e às formas de uso e ocupação antrópica, verificadas dentro da APA, foram a base para geração do modelo de representação cartográfica.

O único setor que apresentou vulnerabilidade baixa correspondeu ao trecho de tabuleiros, localizado ao Sul da área de estudo. São ambientes ecodinamicamente mais estáveis que fornecem melhor suporte ao uso e ocupação. Além disso, este trecho encontra-se fora da frente de avanço do campo de dunas transversais.

A despeito de ser uma Unidade de Conservação, a ocupação humana e os indicadores de alterações ambientais em curto prazo na APA são evidentes, podendo ter como consequência o déficit no suprimento de areia eólica, modificações no sistema dunas-praia e erosão costeira.

3 – AVALIAÇÃO DA DINÂMICA DUNAR

3.1 Cálculo das taxas de transporte sedimentar e migração eólica das dunas de *bypass*

3.1.1 Parâmetros Meteorológicos Atuantes na Migração das Dunas de Paracuru

O comportamento eólico e a distribuição da precipitação ao longo do ano foram os principais componentes atmosféricos a serem considerados no transporte sedimentar das dunas na planície costeira de Paracuru. Estes parâmetros atuam mediante a sazonalidade climática observada para o Estado do Ceará.

Observou-se que, durante o primeiro semestre do ano, as precipitações foram elevadas e os ventos incidentes (predominantes das direções SE e ESE) apresentam baixa velocidade, ao passo que no segundo semestre o quadro se inverteu: os ventos atuaram com mais força (oriundos de NE e ENE) e as chuvas diminuíram.

3.1.2 Precipitação e Velocidade Média dos Ventos

No município de Paracuru, as precipitações concentram-se no primeiro semestre de ano, sobretudo entre os meses de março e maio, em resposta à atuação da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), principal sistema atmosférico responsável pela quadra chuvosa no Ceará. O período de estio ocorre no segundo semestre do ano, onde se observa um decréscimo nos índices pluviométricos e um aumento gradativo da temperatura na área (CEARÁ, 2020a).

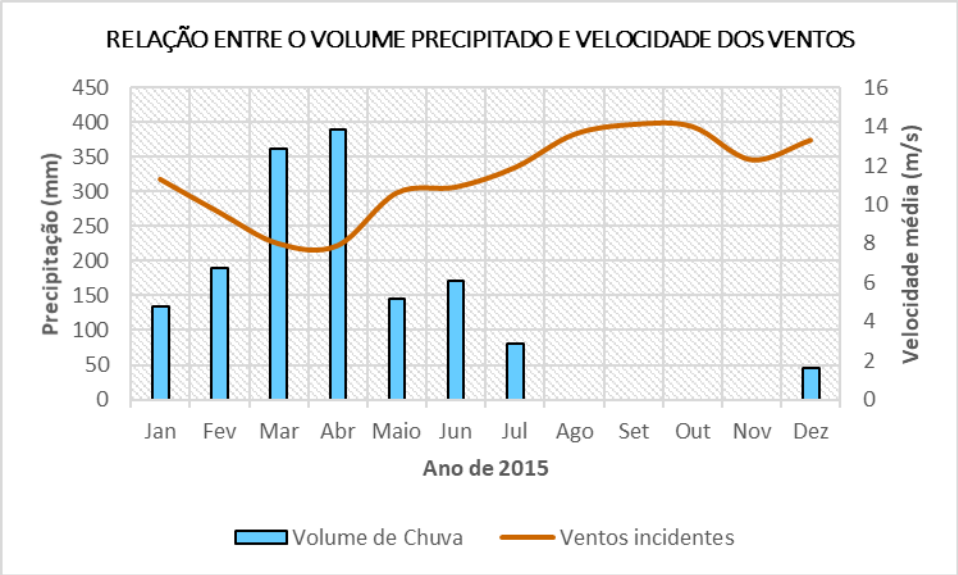
Vale ressaltar que os fenômenos *La Niña* e *El Niño* Oscilação Sul (ENOS) podem acarretar, respectivamente, o aumento e a diminuição das precipitações no município, pois interferem na atuação da ZCIT. Fernandez e Muehe (2006) apontam como os anos de resfriamento e aquecimento superficial das águas do Oceano Pacífico agem sobre a quadra chuvosa no Nordeste brasileiro.

Sobre a atuação do fenômeno ENOS em Paracuru, Castro e Calheiros (2003), analisando fotografias aéreas e dados de chuva entre 1903 e 1999, sugerem aumento na quantidade de dunas barcanas durante períodos mais secos (*El Niño*) e dunas parabólicas durantes períodos mais chuvosos (*La Niña*).

O regime de ventos atuantes em Paracuru também apresenta comportamento semelhante ao verificado para todo o Estado do Ceará. Ou seja, são mais fracos no primeiro semestre e mais fortes a partir do mês de julho. O gráfico da figura 6 mostra

a relação entre a precipitação e a média mensal dos ventos no município, tendo como base o ano de 2015.

Figura 6 Distribuição mensal da precipitação e da velocidade média dos ventos em Paracuru.



Fonte: Rocha (2017).

Segundo o gráfico, as precipitações se concentraram no primeiro semestre do ano e apresentaram diminuição significativa entre agosto e novembro. Os meses de fevereiro a abril somaram 940 milímetros, o que representou 60% do volume total precipitado naquele ano (1.517mm). A normal climática para o município de Paracuru é de 1.211 mm de chuva anual (CEARÁ, 2020b).

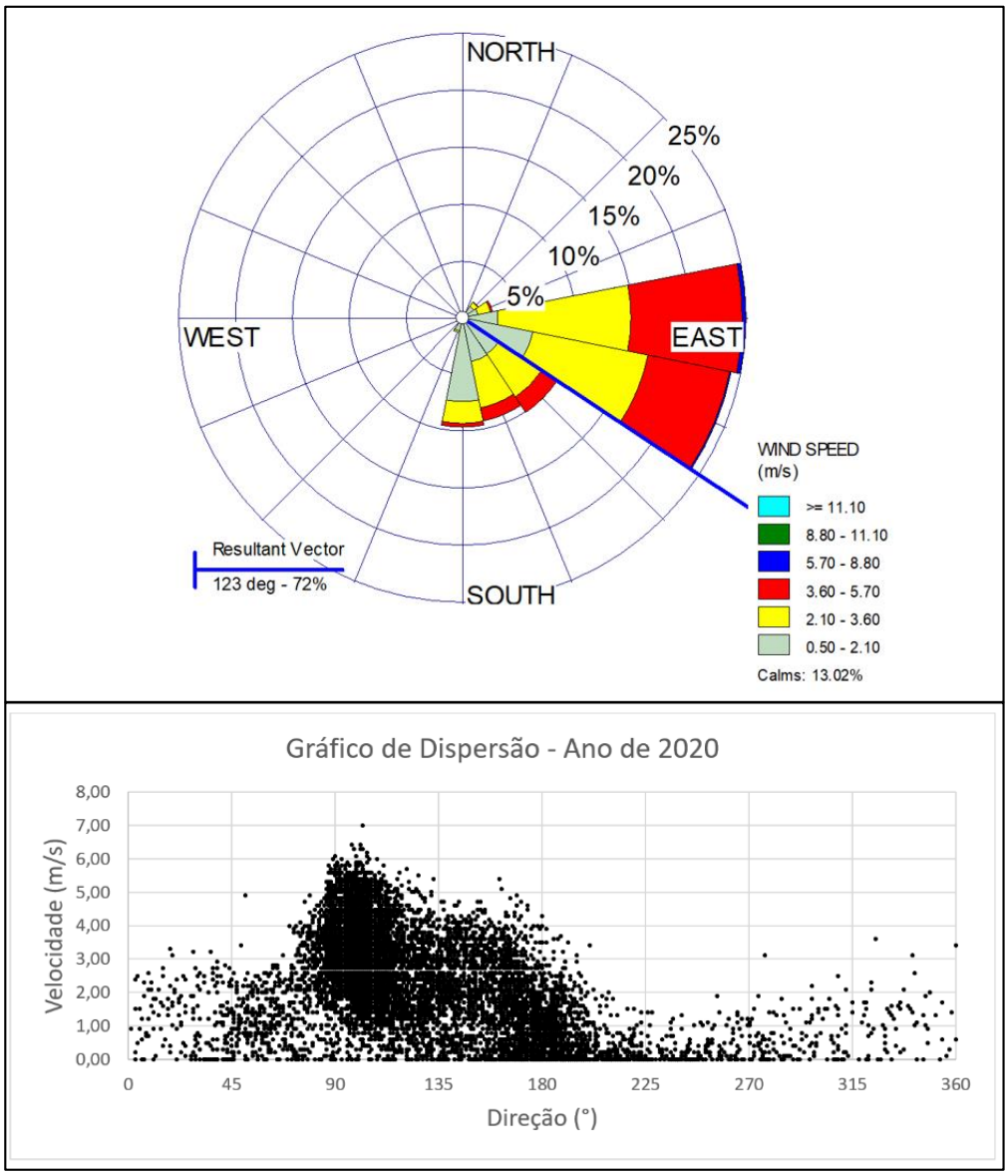
Ao contrário, os dados eólicos de 2015 indicaram ventos mais fortes a partir do segundo semestre, com picos nos meses de setembro e outubro, cujas médias ultrapassaram 14 m/s (equivalente a rajadas de 50 km/h). As médias mais baixas de velocidade foram registradas nos meses de março e abril (durante a quadra chuvosa), evidenciando, portanto, a relação inversa na intensidade de atuação dos parâmetros meteorológicos de vento e chuva no ano.

3.1.3 Direção de Incidência dos Ventos

A direção de incidência dos ventos apresentada na figura 7 indica a relação entre a velocidade e o quadrante de dispersão e a figura 8 contextualiza a orientação cartográfica considerando a área analisada.

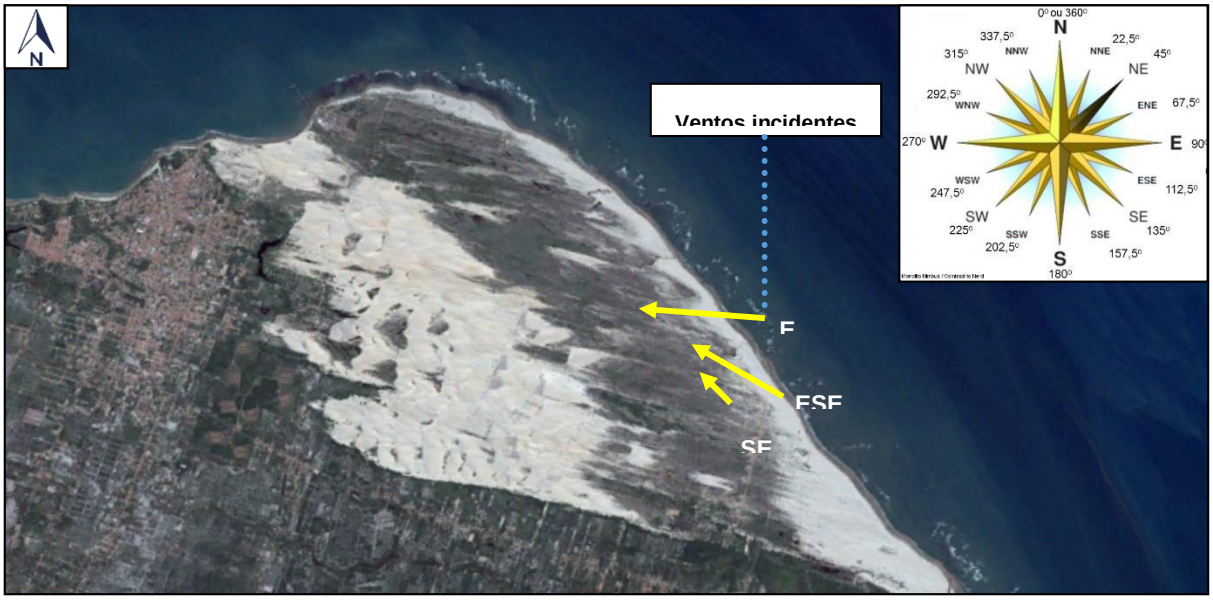
Os ventos incidentes em 2020 indicam direções predominantes de E e ESE, ou seja, entre 90º e 112º. Contudo, foi possível observar ventos oriundos das direções SE e SSE, que coincidem com a entrada dos sistemas atmosféricos responsáveis pelas precipitações entre fevereiro e maio. Os dados eólicos apresentados foram obtidos junto à estação A 305 do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), localizada no município de Fortaleza, e processados no *software WRPlot ViewTM*.

Figura 7 Direção predominante dos ventos incidentes em Paracuru e a dispersão por quadrante.



Fonte: Rocha (2017).

Figura 8 Mapa de orientação cartográfica da direção predominante dos ventos incidentes na planície costeira do município de Paracuru.



Fonte: Google Earth (2020).

3.1.4. Velocidade Anual de Migração das Dunas

O cálculo do avanço médio anual das dunas no litoral de Paracuru foi determinado de acordo com a metodologia de caminhamento realizada por Rocha *et. al* (2020). A velocidade de migração tomou como base o mapeamento por GPS do sopé da duna do Pico Alto, localizada na Praia do Canto, entre janeiro e dezembro de 2015. As variações mensais foram processadas em *softwares* cartográficos, gerando vetores de bordejo da duna que permitiram fazer comparações evolutivas de deslocamento.

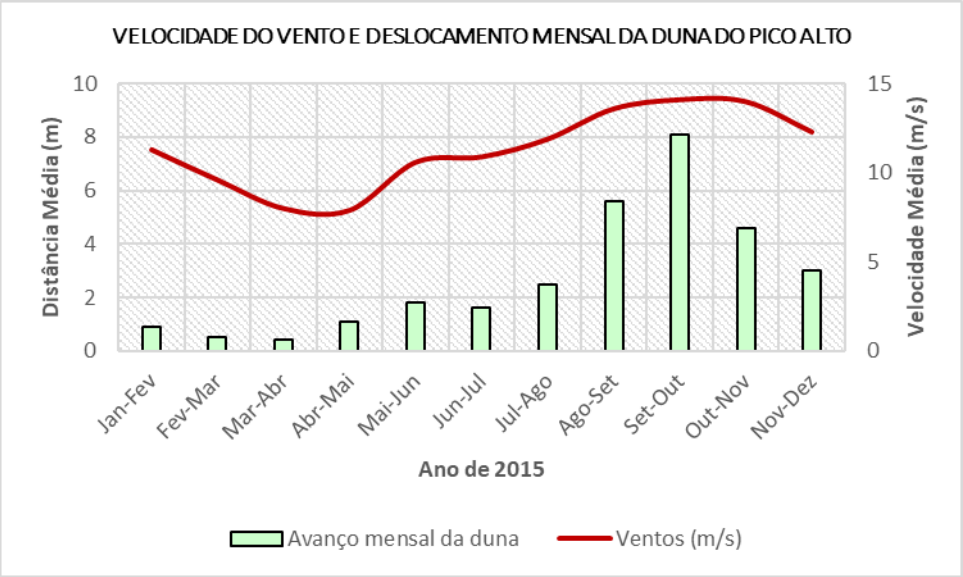
A análise dos dados na figura 9 indicou que a migração das dunas ocorre com mais ênfase no segundo semestre do ano, tendo em vista a presença de ventos mais fortes e ocorrência de baixa precipitação. Verificou-se também que o deslocamento dos sedimentos está orientado mediante a direção predominante dos ventos incidentes na área.

É possível observar que as maiores taxas de migração foram verificadas entre agosto e o início de novembro, coincidindo com o período de ventos mais fortes. Além dos padrões eólicos, a distribuição mensal das chuvas também atuou na velocidade de avanço dos sedimentos, conforme figura 10.

A proximidade das linhas vetoriais geradas na figura 8A indicaram que a duna apresentou baixa velocidade de migração, pois os meses de fevereiro a maio concentraram os maiores volumes de chuvas em 2015. A presença da água na superfície dunar dificulta o transporte dos grãos de areia pela corrente de ar.

Comparando a variação nas linhas de deslocamento da figura 8B, verificou-se que a duna migrou a uma velocidade média 15,2 metros entre maio e dezembro, ratificando a presença de ventos mais fortes nesse período associada a baixa precipitação. Desta forma, os caminhamentos realizados entre janeiro e dezembro de 2015 apontaram uma velocidade média de migração de 30 m/ano para a duna do Pico Alto.

Figura 9 Relação entre velocidade de vento e migração da duna do Pico Alto em 2015.

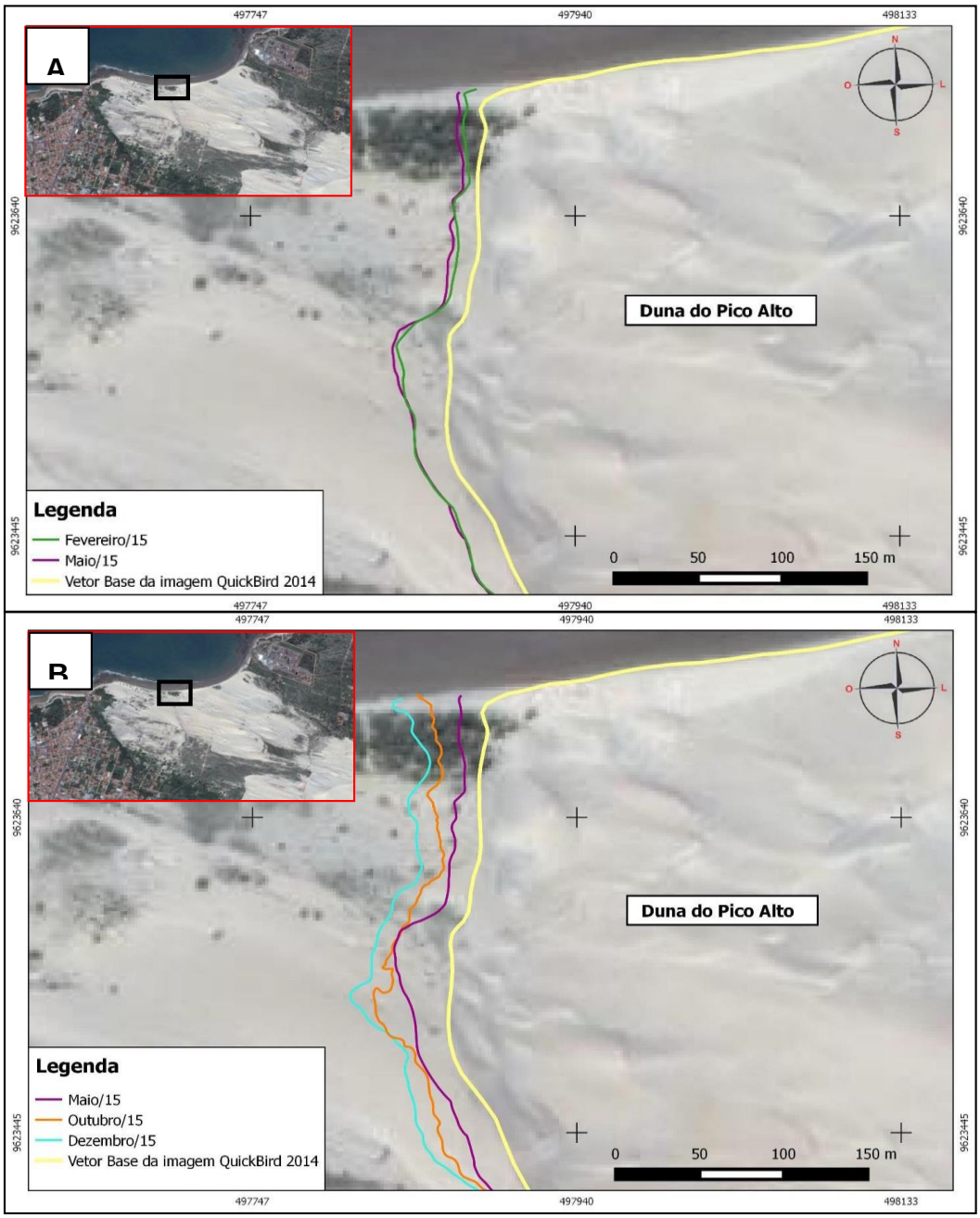


Fonte: Rocha *et. al.* (2020).

Analisando o deslocamento anual de dunas barcanas isoladas também no litoral de Paracuru, Castro (2004) verificou uma taxa média de migração variando entre 11-19 m/ano, utilizando como referência marcos fixos (estacas) dispostos perpendicularmente em relação à frente de avanço das dunas monitoradas. Marques e Meireles (2016) apontaram na mesma região avanço médio de 18,7 m/ano com base na análise temporal de imagens de satélite.

Convém ressaltar que a taxa de migração anual das dunas tende a ser menor em anos com certa regularidade na distribuição das chuvas, como o que vem ocorrendo no município de Paracuru entre os anos de 2016 e 2019 (CEARÁ, 2020b).

Figura 10 Vetores de bordejo indicando deslocamento da duna do Pico Alto em 2015. A) primeiro semestre. B) segundo semestre.



Fonte: Adaptado de Rocha *et. al.* (2020).

3.1.5. Taxas de Transporte Sedimentar (Carga Eólica)

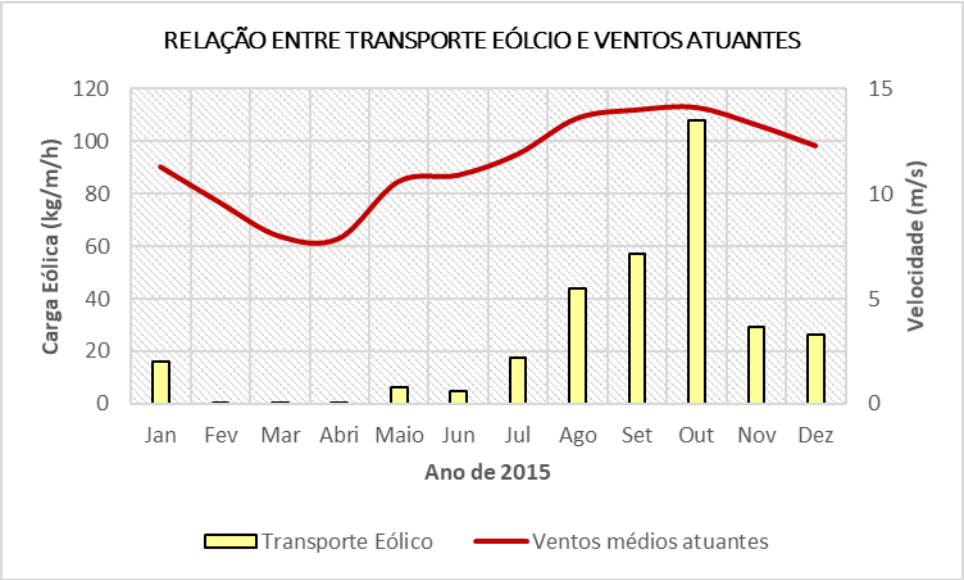
As taxas de transporte eólico nas dunas foram determinadas com base na massa sedimentar deslocada por metro linear a cada hora (nas unidades de kg/m/h). Para tanto, foram utilizadas armadilhas eólicas para a coleta dos grãos de areia transportados pela corrente de ar.

As especificações técnicas dos coletores sedimentares e a metodologia de cálculo da carga eólica aqui apresentadas estão expressas nos trabalhos de Leatherman (1976) *apud* Rosen (1978), Malta e Amaral (2013) e Rocha (2017). Entretanto, outros

modelos de armadilhas eólicas podem ser aplicados, conforme descreve Lancaster (2009).

Em Paracuru, a taxa de transporte eólico foi calculada para os campos de dunas de *bypass* da porção noroeste do pontal litorâneo, tomando como referência a atuação dos parâmetros meteorológicos de chuva e vento ao longo do ano de 2015. O gráfico da figura 11 indica a relação entre a carga eólica mensal e a velocidade média dos ventos.

Figura 11 Relação entre a carga sedimentar eólica e a velocidade média dos ventos nas dunas de *bypass*.



Fonte: Rocha (2017).

Assim como a taxa de migração, o transporte eólico é maior no segundo semestre pois reflete a atuação mais forte dos ventos associada aos altos índices de insolação. A radiação solar aumenta a temperatura na superfície dunar e tornam os grãos sedimentares mais soltos, facilitando a remoção pelo vento.

Entre agosto e dezembro, por exemplo, a carga eólica transportada foi de 264 kg/m/h e correspondeu a 85% do total calculado em 2015. Em contrapartida, nos meses que registraram as maiores chuvas (fevereiro e abril), a taxa de transporte sedimentar foi baixíssima (somando 0,85 kg/m/h), pois a água aglutina os sedimentos e impede seu deslocamento efetivo.

Segundo Rocha (2017), a carga eólica total estimada nas dunas de *bypass* em 2015 foi de 50 m³/m/ano, tomando como base o tempo diário de maior efetividade do transporte (entre 09h:00min e 17h:00min) e considerando a relação entre a massa e o volume do grão de areia fina (1500 kg/m³), especificado na NBR 16661/2017 da Associação Brasileira de Normas e Técnicas (ABNT).

Em estudos realizados na mesma área, Castro (2001) estimou uma taxa de transporte sedimentar em direção ao mar correspondente a 37,1 m³/m/ano, com base na fotointerpretação de duas imagens aéreas (datadas de 1958 e 1999).

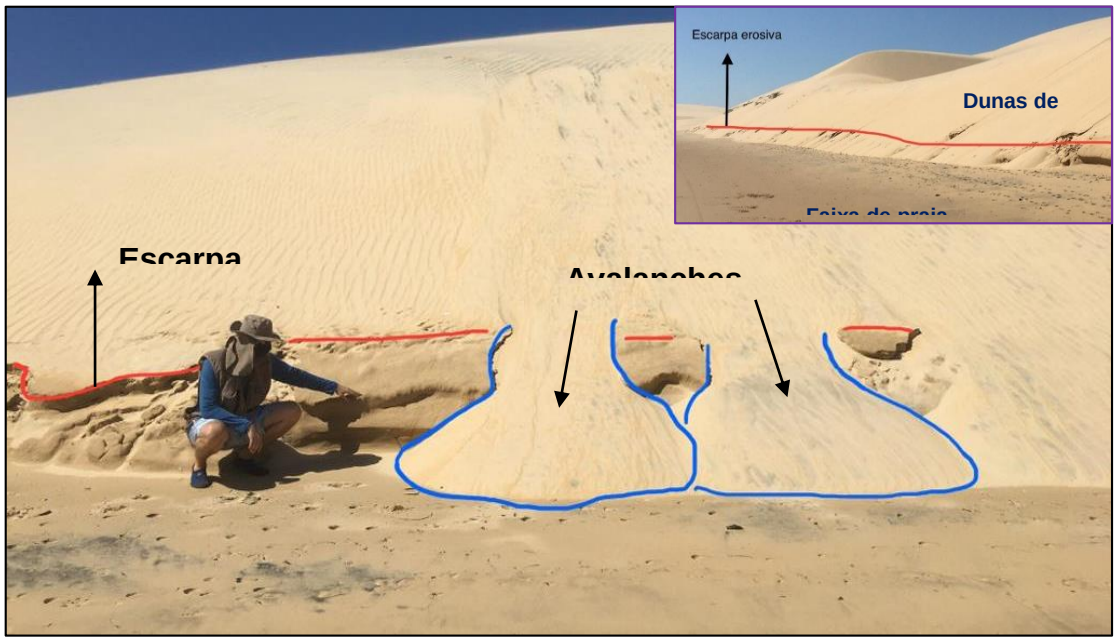
3.2 Avaliação da dinâmica entre os sistemas duna e praia no controle sedimentar local

A transpasse dos sedimentos entre os ambientes de duna e praia foram analisados por Rocha (2017), que apontou como mecanismos de transferência a ação das ondas, avalanches nas dunas e o transporte eólico na faixa de praia. Para o calibre das informações, foram analisadas as variações na morfologia praial (perfil de praia) e a classificação granulométrica com base em coletas sedimentares na Praia do Canto e Praia das Almas e nas dunas Pico Alto e Boca do Poço.

Foram observadas duas formas de transpasse sedimentar dos sistemas eólicos para o sistema praial. A primeira é caracterizada pelo ataque dispersivo de ondas nas dunas de *bypass* durante as marés de sizígia e marés meteorológicas (eventos de alta energia), ficando evidente pela formação de escarpas erosivas de solapamento. Farias e Souza (2012) discorrem sobre a influência dos eventos de alta energia na costa oeste do Estado do Ceará.

A segunda forma de transpasse é consecutiva da primeira e caracteriza-se pelo volume de sedimentos eólicos depositados na faixa de praia após eventos de avalanche nas dunas, conforme evidencia a figura 12.

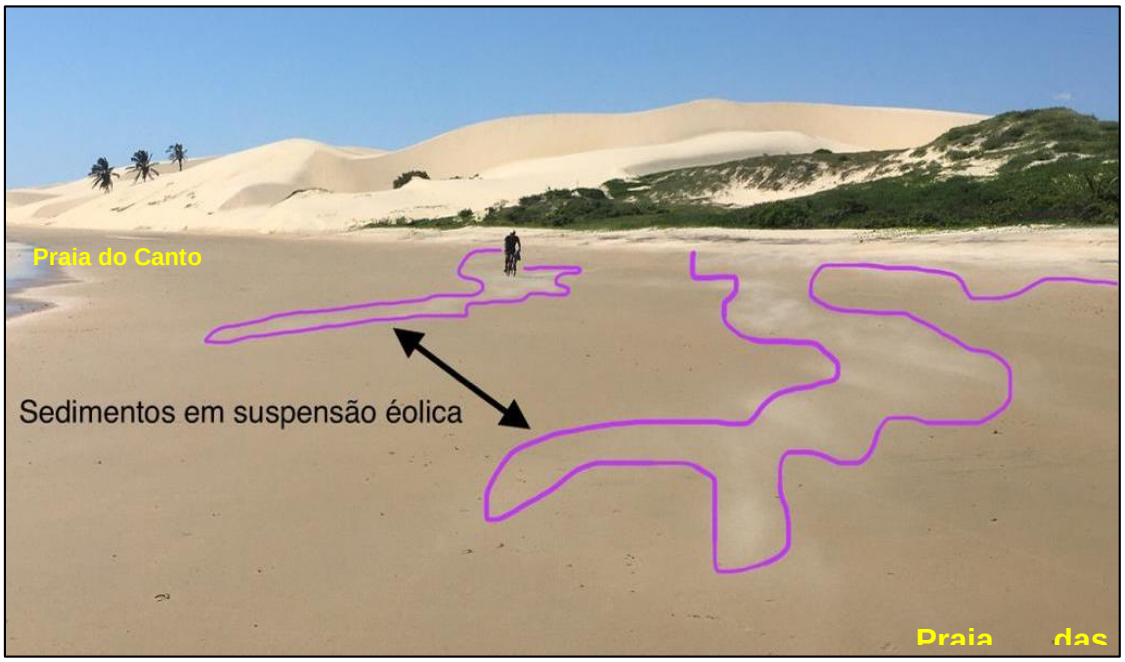
Figura 12 Sedimentos eólicos transportados por avalanche e depositados na faixa de praia.



Fonte: Greentec (2021).

A estimativa calculada na duna Pico Alto indicou 15 m³ de sedimentos deslocados para a Praia do Canto após ciclos de avalanche que duraram um total de 2h:30min. Após a deposição, as areias são expostas ao transporte eólico e distribuídas para as praias adjacentes, conforme figura 13.

Figura 13 Sedimentos eólicos transportados e distribuídos ao longo da faixa de praia.



Fonte: Greentec (2021).

Foi calculada da taxa de deslocamento dos sedimentos em suspensão eólica entre a Praia do Canto e a Praia das Almas, com base na disposição dos coletores de areia. O monitoramento em um trecho de praia próximo à duna do Pico Alto apresentou carga eólica total de 28 kg/m/h.

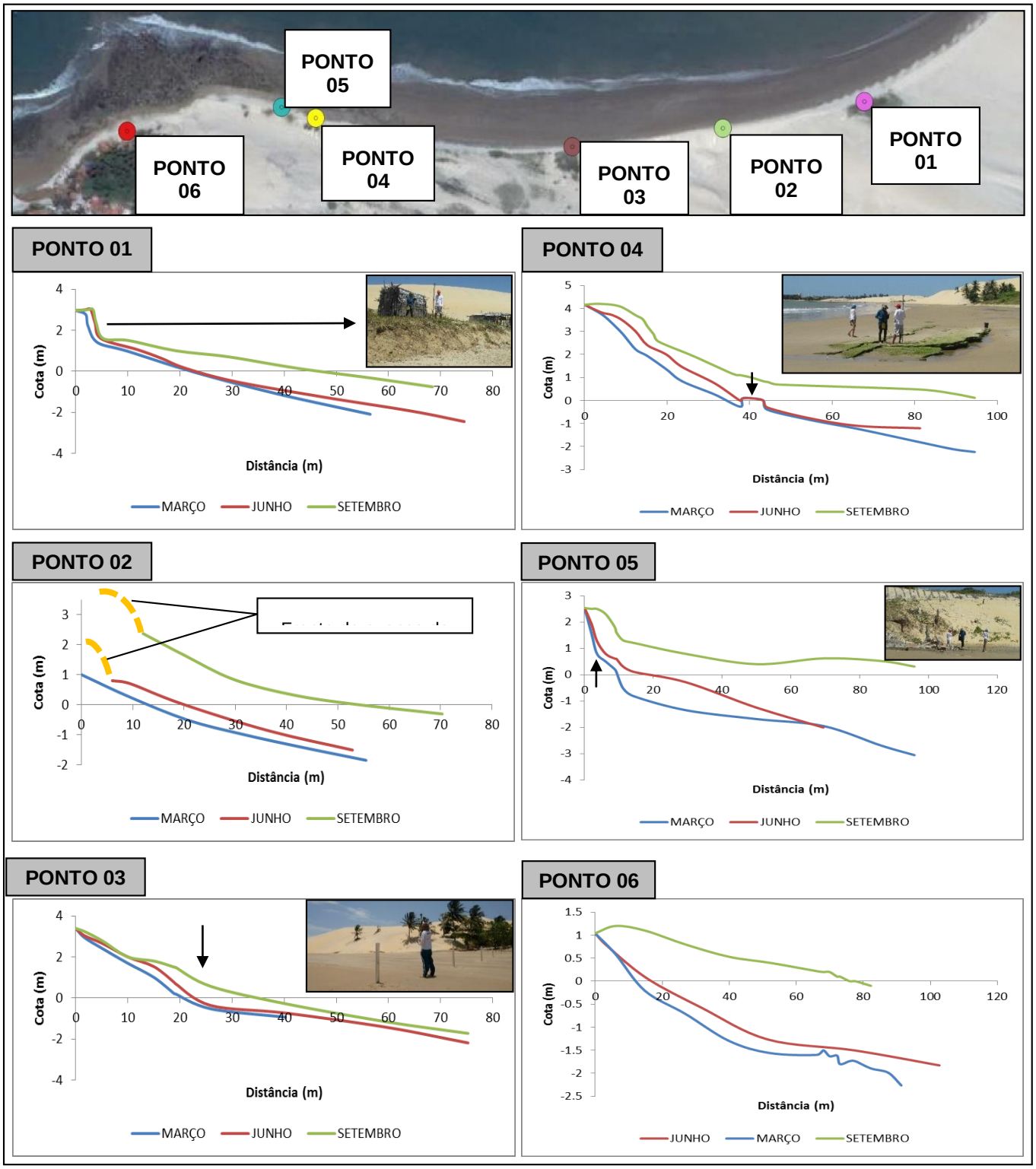
3.3 Avaliação do comportamento morfodinâmico das praias com base nos mecanismos hidrodinâmicos e eólicos de transferência

Os sedimentos das dunas que caem por avalanche são transportados pelo vento e distribuídos para as praias do Canto e das Almas, ficando, portanto, submetidos aos processos morfodinâmicos locais.

Os estágios morfológicos das praias do Canto e das Almas (apresentados na figura 14) indicam que a hidrodinâmica marinha prevalece no primeiro semestre do ano, remobilizando sedimentos da faixa praial em função da atuação dispersivas das ondas durante as marés meteorológicas. Como resposta ao processo erosivo, os perfis de praia tendem a ficar mais inclinados e a frente de avanço das dunas, mais recuada.

Analisando a morfodinâmica praial e o balanço sedimentar, Lima (2019) apontou tendência erosiva entre as praias das Almas e Coqueirinho, durante os meses de março e julho.

Figura 14 Estágios morfológicos em trechos da Praia do Canto e Praia das Almas.



Fonte: Rocha (2017

No segundo semestre, os perfis morfológicos de Rocha (2017) indicaram que há acreção sedimentar motivada pelo transporte dos sedimentos eólicos na faixa de praia. Portanto, o transpasse sedimentar das dunas para a faixa de praia e para deriva litorânea revelam que os depósitos eólicos de *bypass* do promontório de Paracuru possuem grande importância na manutenção da dinâmica costeira no município.

Sousa (2007) indicou que o litoral de Paracuru apresenta trechos de praia com tendência à erosão, tornando-se áreas vulneráveis ao uso e ocupação. Portanto, garantir o fluxo e a distribuição sedimentar entre os sistemas praia e duna é preciso.

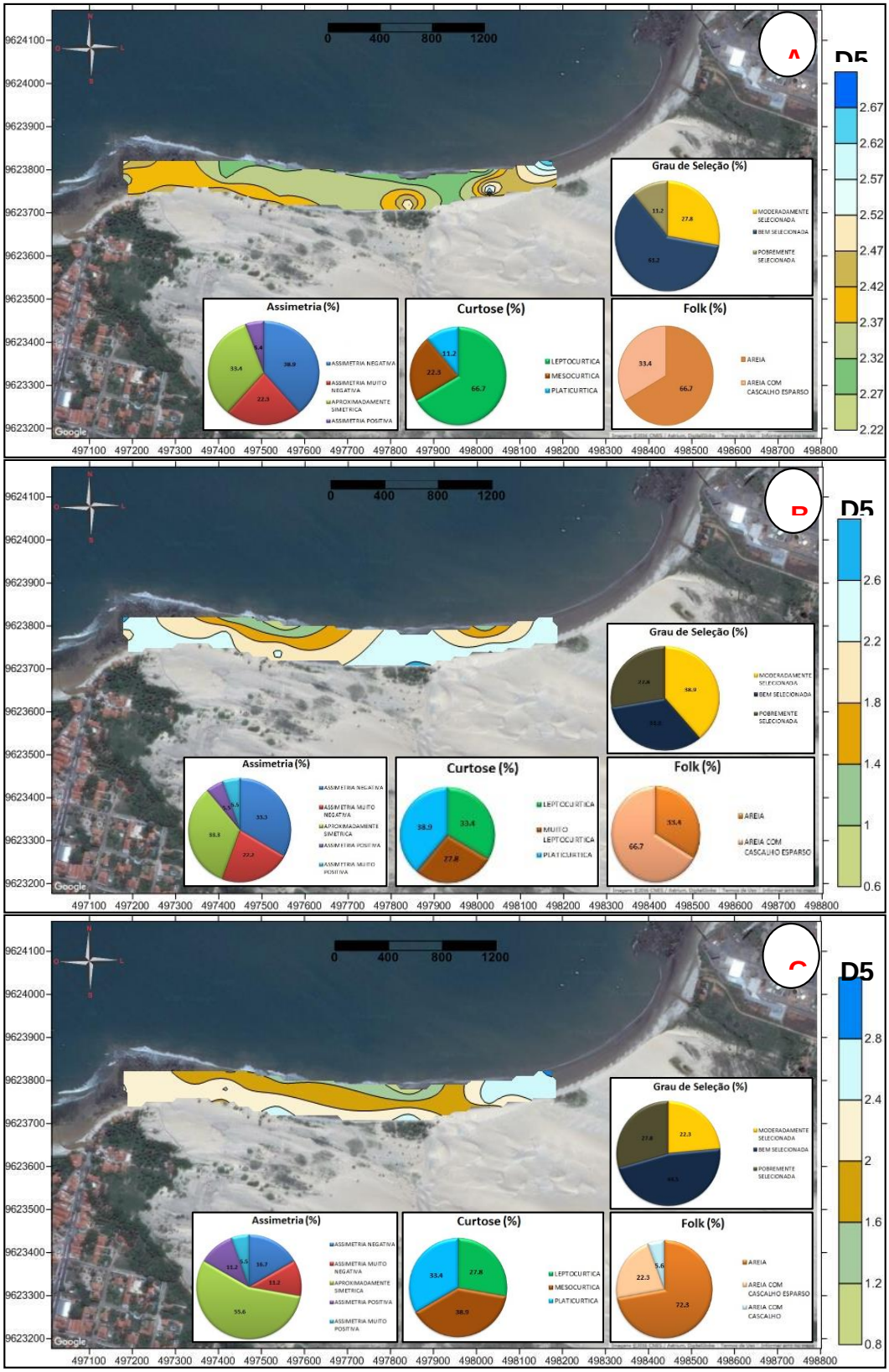
3.3.1 Análise Estatística do Grão Sedimentar

A análise dos parâmetros estatísticos dos grãos sedimentares foi realizada a fim de confirmar a distribuição das areias eólicas das dunas de *bypass* para as praias adjacentes. A classificação granulométrica tomou como base os indicativos de curtose, grau de seleção, assimetria e mediana. A figura 15 mostra a distribuição sedimentar entre as dunas e faixa de praia.

Os dados indicaram que setores emersos na Praia do Canto e Praia das Almas são compostos em grande parte por areias dunares, ratificando que há forte interação entre os sistemas eólicos e praial no que diz respeito à manutenção do equilíbrio sedimentar costeiro na área.

Durante as marés altas, a abrasão marinha solapa a base das dunas e introduz os sedimentos na faixa de praia. Nas marés baixa, a distribuição das areias ocorre predominantemente pelo transporte eólico. Esta combinação entre agentes hidrodinâmicos e eólicos ao longo do ano torna este setor da costa uma área fundamental de transferência sedimentar.

Figura 15 Interação entre os sistemas duna e praia com base na análise estatística dos grãos sedimentares. A) março/2015. B) junho/2015. C) setembro/2015.



Fonte: Rocha (2017).

A classificação sedimentar no mês de março revelou presença de areia fina em praticamente toda faixa praial. A incidência das ondas nas dunas remobiliza os sedimentos eólicos e os distribui na faixa de praia emersa e antepraia. No mês de setembro, a classificação indicou areias médias e grossas na antepraia e fração de areia fina no pós-praia. Ou seja, a partir do segundo semestre, o fluxo eólico passa a contribuir mais efetivamente no transporte e distribuição das areias dunares para as praias adjacentes (ROCHA, 2017).

A interação do transporte sedimentar entre os sistemas duna e praia são bastante conhecidos na literatura mundial, cabendo destacar os trabalhos de Sherman e Bauer (1993); Nordstrom *et al* (1996); Psuty (2008) e Nordstrom *et al* (2011).

3.4 Prognóstico da migração dos campos de dunas da APA das Dunas de Paracuru

A problemática do avanço das dunas em Paracuru é recorrente e remota à própria história local. Segundo Albuquerque (2003), o antigo povoado chamado Parazinho, que deu origem ao município, foi totalmente soterrado em meados do século XIX.

A crescente urbanização do município nas últimas décadas tem potencializado o risco de soterramento, pois parte da cidade se expandiu para as áreas próximas à frente de avanço das dunas (como é o caso das residências no entorno da comunidade da Boca do Poço), na. Figura 16.

A partir da interpretação espacial de duas imagens aéreas, com intervalo de 41 anos (1958 a 1999), Castro e Gonçalves (2003) identificaram expansão de 245,87 m² do campo de dunas móveis transversais na planície costeira de Paracuru. Já a estimativa do transporte eólico calculado em direção à malha urbana foi de 93,02 m³/m/ano.

Ainda segundo os autores, mantidas as condições de vento e precipitação daquele período monitorado e, desconsiderando qualquer fator (natural ou antrópico) de fixação das dunas ao longo prazo, o prognóstico aponta que em 120 anos grande parte da cidade de Paracuru estará soterrada.

Analisando a disposição espacial dos sistemas eólicos transversais na APA das Dunas de Paracuru em 4 imagens de satélite, datadas de 2004, 2008, 2014 e 2020 (tabela 3), foi possível estabelecer o diagnóstico e prognóstico de avanço do campo dunar com base na análise vetorial da migração, conforme mostram os mapas das figuras 17, 20 e 22.

O mapa da figura 17 mostra os vetores correspondentes às frentes de avanço entre os anos analisados, bem como os transectos e as linhas de base geradas para a modelagem do avanço. A partir do produto gerado, foi possível calcular as taxas de migração e retração das dunas móveis, por meio de métodos estatísticos processados pela extensão *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS), versão 5 para o *software* ArcGis 10.6, como aplicado em Long e Plant (2012) e Guerra *et al.* (2021).

Figura 16 Análise temporal da expansão urbana do município de Paracuru entre os anos de 2004 e 2020.

Fonte: Google Earth (2020).

Tabela 3 Descrição das imagens orbitais utilizadas na análise vetorial da migração dunar.

Imagem	**Ano**	**Resolução Espacial**
Airbus (Pléiades)	2004	1 metro
IPECE	2008	2 metros
Airbus (Pléiades)	2014	1,2 metros
Planet	2020	3 metros

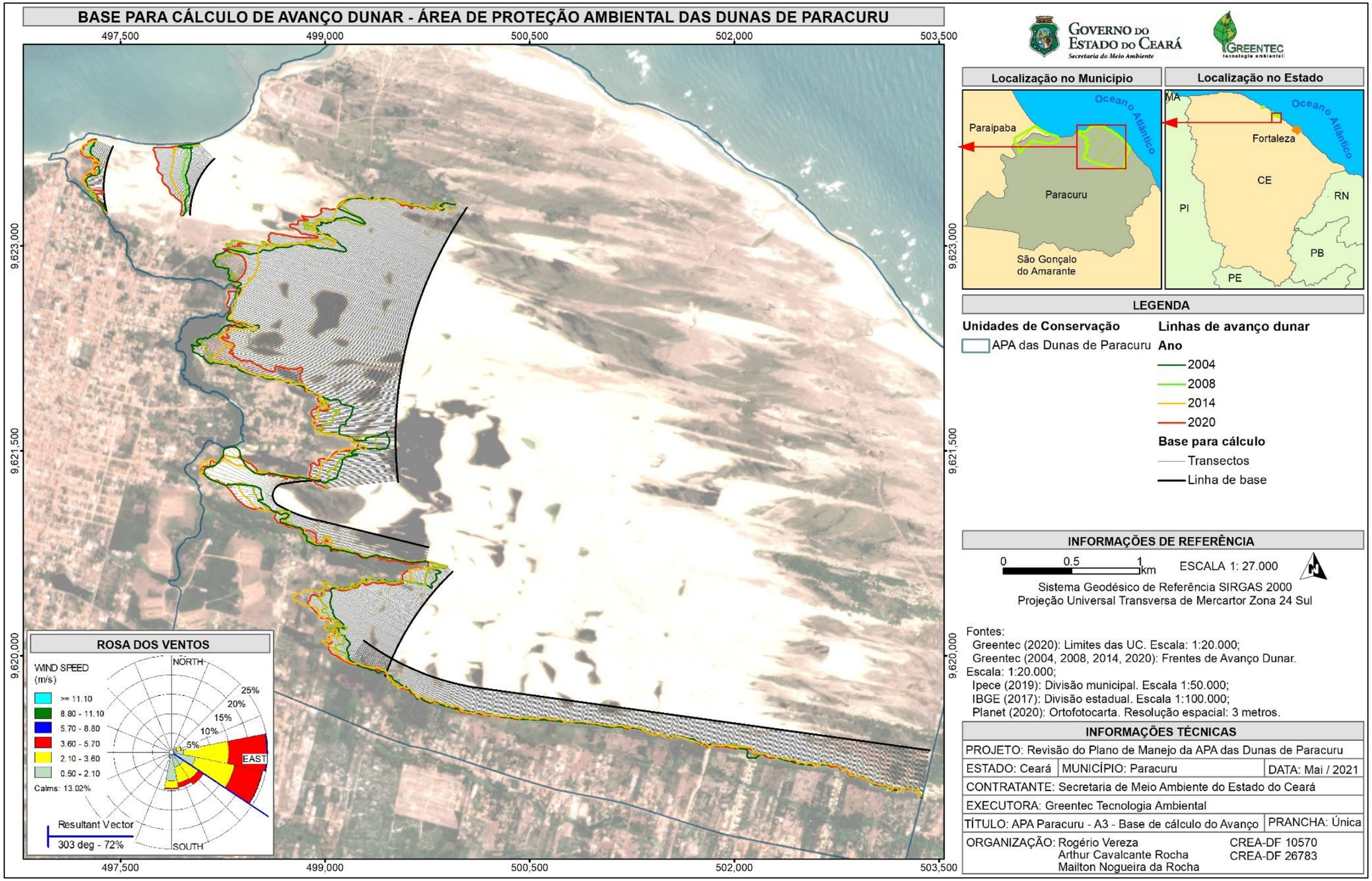
Fonte: Greentec (2021)

O DSAS trabalha gerando transectos ortogonais a uma linha de base determinada pelo usuário (baseline). Com espaçamento definido, estes transectos devem cruzar as linhas de base da face de deslizamento da duna para cada ano vetorizado, de modo que as taxas de variação são calculadas a partir do distanciamento entre linhas de base e ano de registro. Dentre os métodos estatísticos apresentados pelo DSAS o mais aprimorado é o LRR (*Linear Regression Rate*).

O LRR trata-se da regressão linear simples entre as distâncias das linhas de avanço de cada ano registrado e da linha de base traçada. A Figura 18 ilustra o processamento do cálculo da taxa de avanço dunar a partir das linhas de regressão.

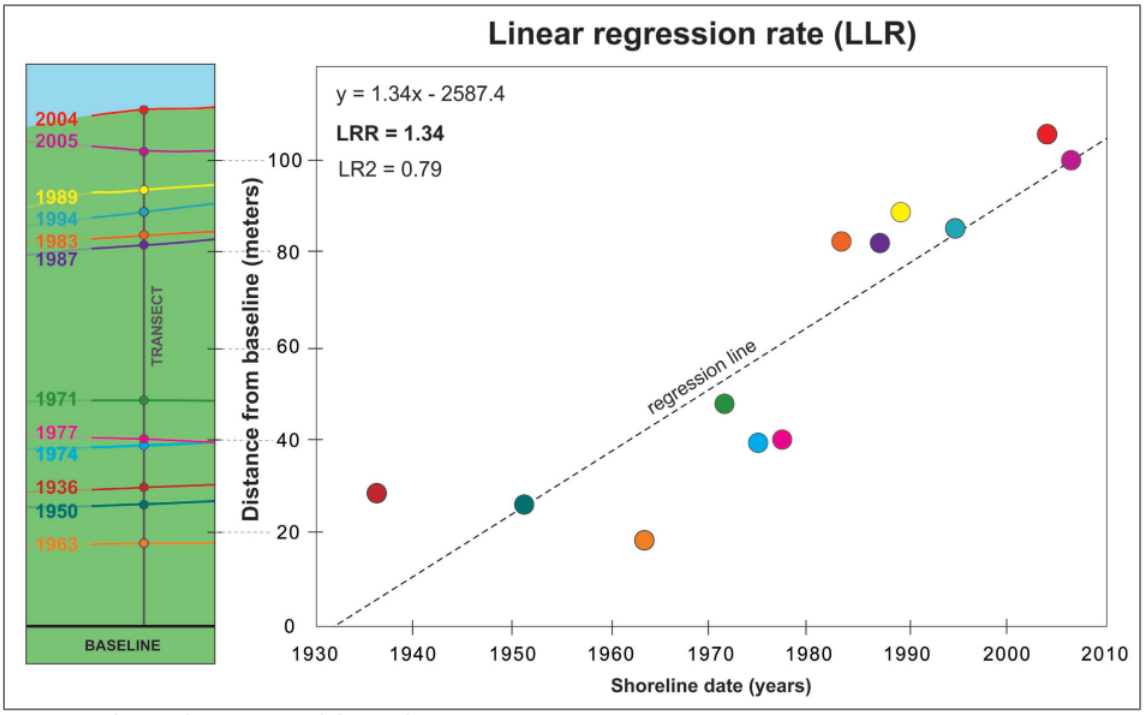
.

Figura 17 Registro espacial do avanço dos campos de dunas móveis na planície costeira de Paracuru entre os anos de 2004 e 2020.



Fonte: Greentec (2021).

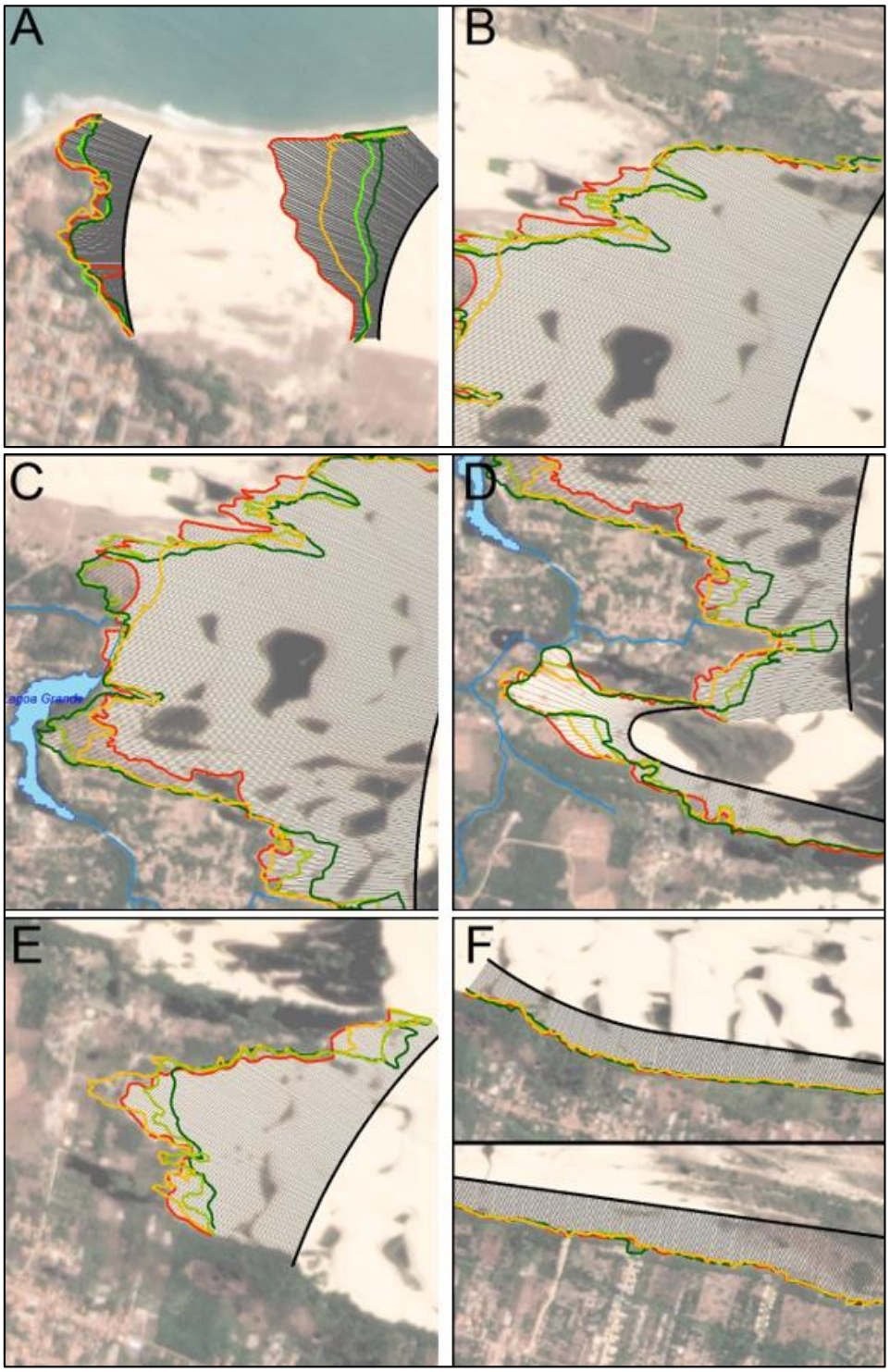
Figura 18 Representação esquemática do cálculo de taxa de avanço dunar pelo método da regressão linear (LRR).



Fonte: Himmelstoss *et al* (2018).

A linha de base do modelo foi definida a partir do sentido preferencial de incidência dos ventos para o ano de 2020, obtido junto à estação Fortaleza A 305 do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), localizada na cidade de Fortaleza e distante de 68 km de Paracuru. O processamento dos dados eólicos da estação foi feito pelo programa *freeware WRPlot ViewTM* e a tabulação foi organizada no Excel. A figura 19 setoriza os trechos com as principais frentes de avanço dunar apresentados no mapa da figura 17.

Figura 19 Representação setorial das frentes de avanço dunar. Legenda: A - Dunas Boca do Poço e Pico Alto; B - Estrada da Petrobrás; C - Lagoa Grande; D - Mocó; E - Campo Semente; F – Contato com tabuleiro (trecho oeste acima, trecho leste abaixo).



Fonte: Greentec (2021).

Na figura 19(A) fica evidente o avanço da Duna Pico Alto para oeste em direção à Duna Boca do Poço, este avanço se apresenta mais marcante na porção noroeste da duna, indicando deslocamento para o mar (transpasse sedimentar). A Figura 19(B) mostra o avanço da duna sobre a estrada de acesso a base da Petrobras.

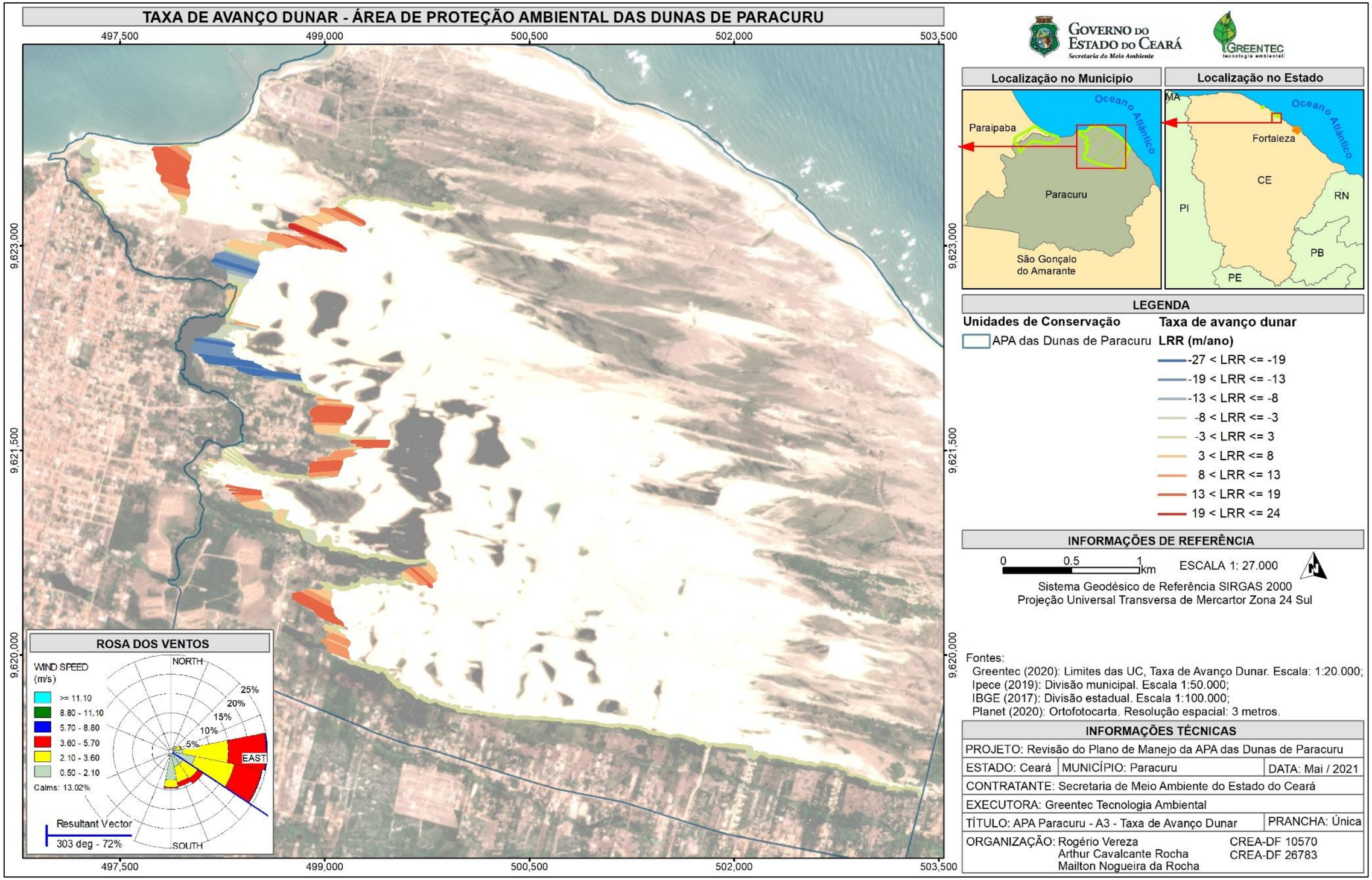
A figura 19(C) reflete as frentes de avanço sobre a Lagoa Grande e segue o mesmo padrão direcional de avanço da área da estrada da Petrobras. Ao Norte da Lagoa as frentes evidenciam um avanço maior, enquanto ao Sul o avanço é pouco evidente.

A figura 19(D) corresponde à área do Mocó, apresentando dois pacotes dunares distintos. A porção mais ao Norte apresenta uma frente claramente direcionada ao Leste-Oeste com comportamento de avanço progressivo. A porção mais ao Sul mostra um maior avanço, deixando mais evidente um braço sedimentar longitudinal.

Na figura 19(E) – representa as frentes de avanço de Sudeste-Noroeste sobre a região de Campo Semente. Na figura 19(F) é apresentada o encontro evidente entre o campo de duna e o grupo geológico barreiras. Neste trecho, as frentes de avanço não possuem expressividade pois a direção predominante do transporte está orientada paralelamente a estrada do São Pedro.

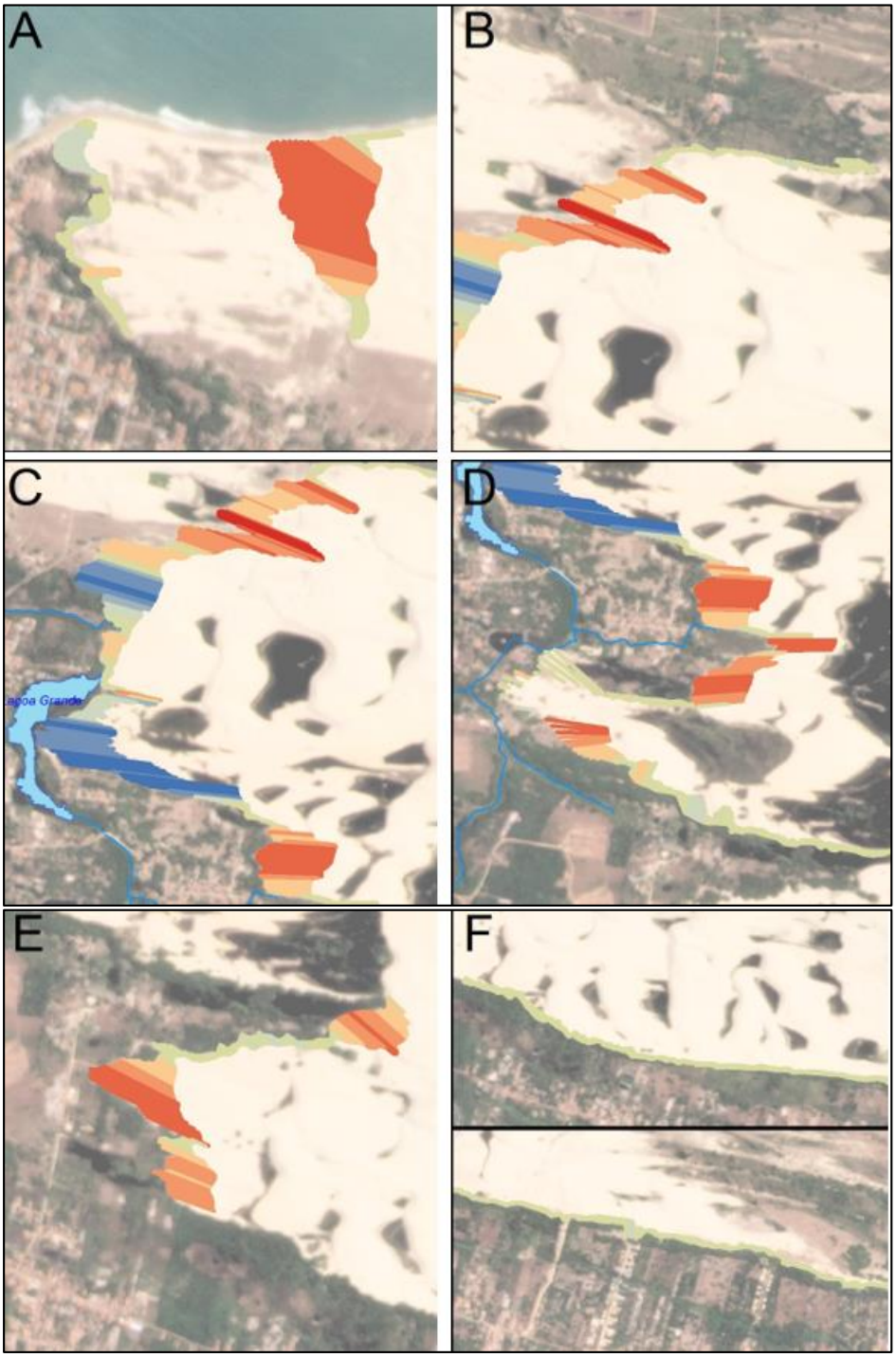
As taxas de avanço dunar mostradas na figura 20 indicaram trechos com deslocamento máximo de 24 m/ano, representados pela cor vermelha. Em contrapartida, as áreas estabilizadas (cor azul) representam os setores com crescimento de vegetação (proximidades da Lagoa Grande) ou as áreas com intervenção humana na ocupação do solo (trecho próximo ao píer da Petrobrás). A figura 21 apresenta os trechos setorizados evidenciando a taxa de avanço dunar.

Figura 20 Taxas de avanço dos campos de dunas móveis na planície costeira de Paracuru entre os anos de 2004 e 2020.



Fonte: Greentec (2021).

Figura 21 Detalhamento das taxas de migração dunar por setores. Legenda: A - Dunas Boca do Poço e Pico Alto; B - Estrada da Petrobrás; C - Lagoa Grande; D - Mocó; E - Campo Semente; F - Contato com tabuleiro (trecho oeste acima, trecho leste abaixo).



Fonte: Greentec (2021).

Na figura 21(A) são analisadas duas frentes de avanço. A frente da duna Boca do Poço apresentou taxa de avanço de 6,53 m/ano (o que representa 77% da área) e uma taxa de retração de -4,81 m/ano, o que indica a colonização da vegetação. A frente da duna Pico Alto teve avenço positivo em 87% de sua área, como deslocamento máximo de 18,34 m/ano.

Na figura 21(B) foram identificadas taxas 23,04 m/ano correspondente ao trecho eólico situado próximo à estrada da Petrobras, o que reflete avanço positivo em 79% da frente dunar. Neste recorte, foi possível observar retração até -19,2 m/ano mais ao Sul (desenvolvimento de vegetação).

A área da Lagoa Grande, representada na figura 21(C), registrou taxas de avanço de 8,18 m/ano na área mais a jusante da Lagoa até retração de -26,5 m/ano mais a montante do corpo hídrico, onde está havendo uma colonização de vegetação campestre, arbustiva e com alguns exemplares florestais. Em função disso, apenas 38% da frente de avanço apresenta comportamento positivo de avanço sobre a Lagoa Grande, essencialmente na sua porção Norte.

A área do Mocó, figura 21(D), apresenta 78% de avanço positivo, com velocidade de migração de 18,87 m/ano. A área correspondente ao Campo Semente, figura 21(E), apresentou taxas desde 17,72 m/ano até retração de -3,45 m/ano, onde há vegetação desenvolvida

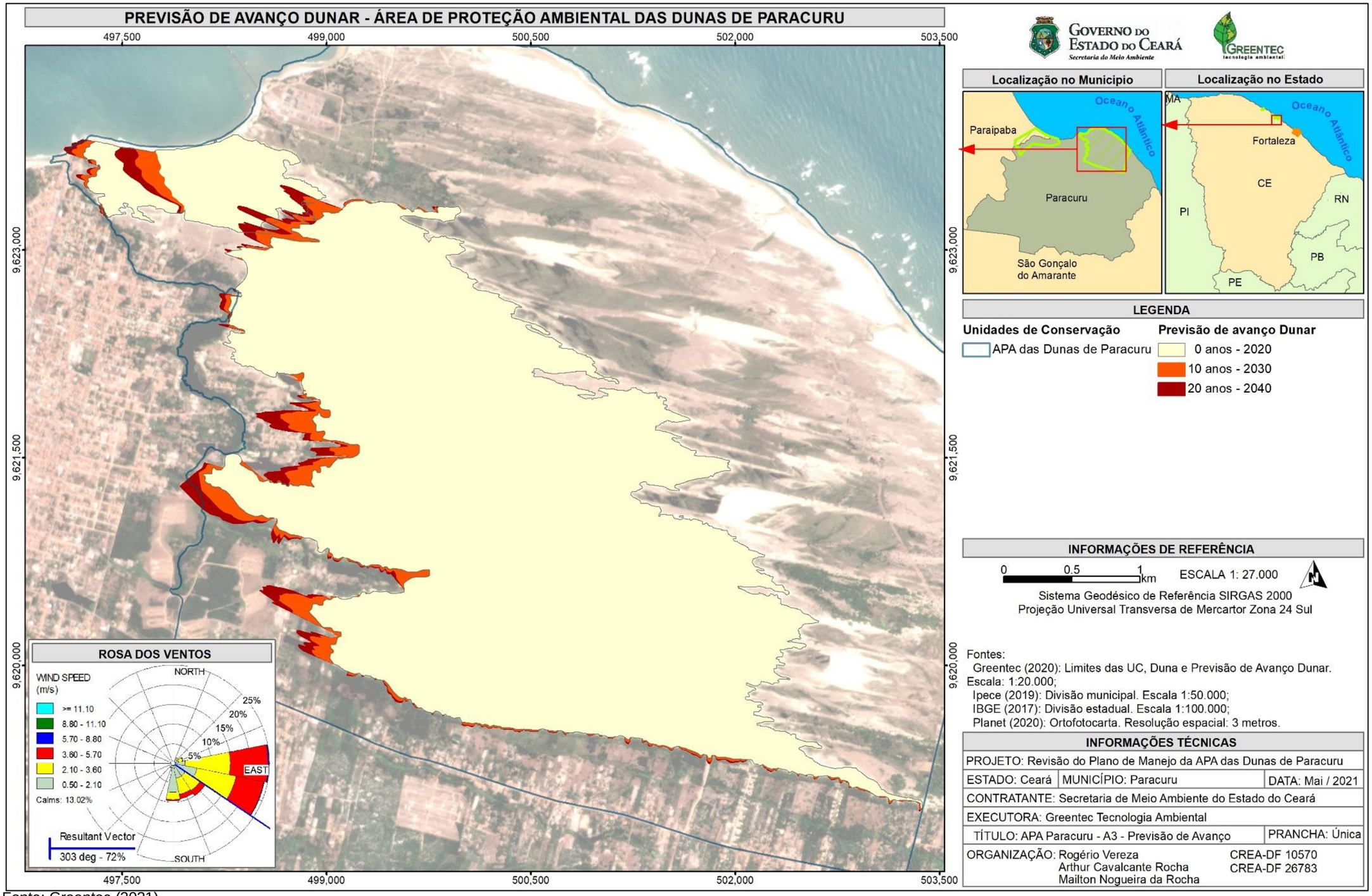
Por fim, as taxas de avanço dunar registradas no trecho ao Sul da APA (no contato com o tabuleiro) foram menores, apresentando deslocamento de 1,77 m/ano e retração de -3,51 m/ano, figura 21(F).

Desta forma, foi possível realizar o prognóstico da migração dunar para os próximos 10 e 20 anos (figura 22). As frentes de deslocamento expressas para os anos de 2030 e 2040 foram geradas a partir da modelagem obtida com os dados da taxa de migração. O mosaico da figura 23 detalha os resultados com foco nas áreas de interesse para intervenção.

A previsão do avanço dunar foi estimada também foi realizado pela extensão DSAS baseada no filtro de Kalman. Este modelo combina as posições observadas da linha da costa com as posições derivadas do modelo LRR para prever uma posição futura da linha de avanço.

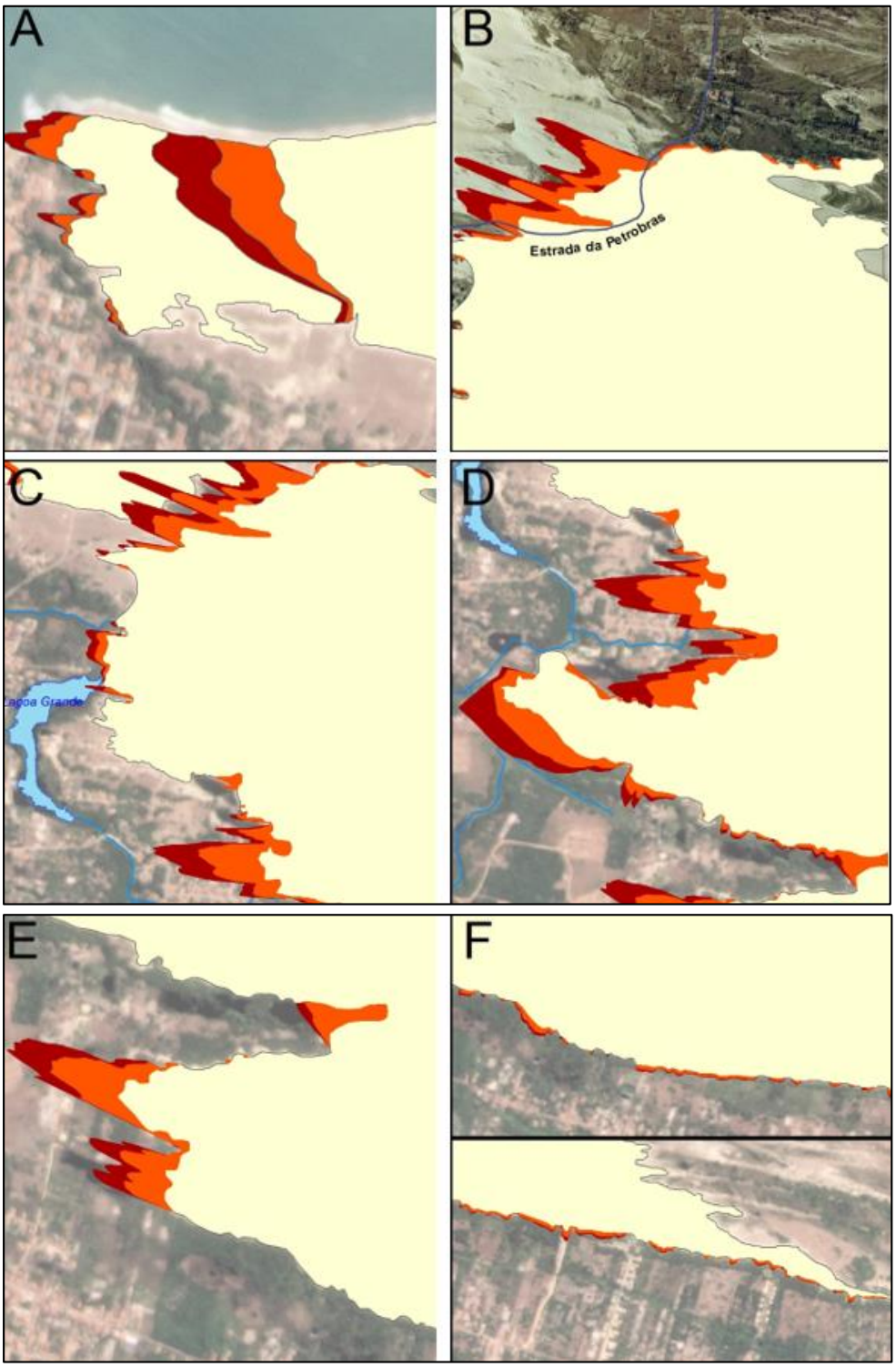
Portanto, a modelagem permitiu definir as estratégias de intervenção e classificar as áreas prioritárias do projeto executivo de contenção. Cabe salientar que as poligonais delimitadas, apresentadas na figura 24, foram também calibradas com mapeamento de campo.

Figura 22 Prognóstico de avanço dos campos de dunas móveis de Paracuru com base na modelagem para os próximos 10 e 20 anos.



Fonte: Greentec (2021)

Figura 23 Detalhamento da taxa de avanço dunar. Legenda: A - Dunas Boca do Poço e Pico Alto; B - Estrada da Petrobrás; C - Lagoa Grande; D - Mocó; E - Campo Semente; F - Contato com tabuleiro (trecho oeste acima, trecho leste abaixo).



Fonte: Greentec (2021).

O prognóstico de avanço para as dunas Pico Alto e Boca do Poço, figura 22(A), mostram um avanço considerável. A frente de avanço da Boca do Poço avançará sobre construções à beira-mar recobrindo esta já nos próximos dez anos. Este avanço ainda poderá ser mais evidente considerando o avanço proeminente da duna Pico

Alto em direção a duna Boca do Poço, acarretando num maior aporte de sedimentos e reativando a frente de avanço em direção à área urbana.

O trecho da duna que avançará sobre a estrada da Petrobras tem previsões significativas de movimentação eólica. Na figura 22(B) fica claro a duna irá se sobrepor a estrada, ou seja, a estrada permanecerá em operação tão somente se houverem constantes intervenções na área.

O assoreamento da Lagoa Grande, figura 22(C), será evidente em sua jusante, onde se localiza a Estação de Tratamento de Água (ETA). Além disso, o trecho seguinte ao Riacho Boca do Poço e algumas construções no entorno poderão ser recobertos pelos sedimentos.

A área correspondente ao Mocó, figura 22(D), também apresenta previsões de avanço preocupantes para os loteamentos e propriedades particulares que estão próximas às frentes de migração. Da mesma forma, as propriedades localizadas na região do Campo Semente, figura 22(E), encontrar-se-ão com risco de soterramento nas próximas décadas.

Por fim, a previsão de avanço para o trecho Sul da APA foi tímida, mas não desprezível, figura 22(F). O avanço previsto se dará perpendicularmente em relação a direção preferencial dos ventos e é contido pela vegetação presente na área. Vale ressaltar que os trechos onde o prognóstico apontou maior avanço correspondem àqueles onde se observa hoje supressão da vegetação para uso do solo.

4 – ESTRATÉGIAS DE INTERVENÇÃO

4.1. Definição das ações de contenção e reordenamento territorial

A migração das dunas sobre o promontório de Paracuru tem gerado problemas quando ao soterramento de áreas urbanas e ecossistemas no município. As áreas com mais evidência do avanço das areias estão localizadas principalmente no entorno da comunidade Boca do Poço e na Lagoa Grande (reservatório de abastecimento hídrico da cidade de Paracuru).

Algumas ações foram tomadas por parte dos gestores locais na tentativa de impedir o deslocamento das areias, entretanto não se mostraram efetivas, conforme aponta Rocha (2017) sobre a disposição de palhas de coqueiro na superfície dunar.

As intervenções devem ser planejadas mediante estudo prévio e devem ser licenciadas e acompanhadas pelo órgão ambiental competente. Para tanto, é preciso delimitar áreas prioritárias para as ações de contenção, ao passo que se garanta também o manejo das dunas (mediante políticas públicas de conservação).

As ações de contenção das dunas deverão ser realizadas através do plantio de espécies herbáceas e arbustivas nativas da região, priorizando as áreas mapeadas com maior risco de soterramento. A proposta é que a fixação da vegetação dificulte o deslocamento das areias pelo vento. As ações de contenção estão descritas no Projeto Executivo de Contenção do Avanço do Campo Dunar.

Foram delimitados trechos prioritários para contenção (totalizando 102,29 hectares), distribuídos entre a duna Boca do Poço e os depósitos eólicos próximos da estrada que liga a sede urbana ao píer de atracação da Petrobrás; dunas no entorno da Lagoa Grande e trechos localizados a sudoeste da APA.

A metodologia do plantio deve seguir etapas, cujas ações são estabelecidas mediante o comportamento climático do Estado do Ceará. O plantio das espécies vegetais, por exemplo, deve ocorrer nos meses iniciais da quadra chuvosa a fim de aproveitar a irrigação pela chuva.

É necessário que o projeto executivo de contenção seja organizado e articulado, levando em consideração não só a dinâmica eólica das dunas, mas também o estudo do meio físico e biótico. Além disso, deve-se projetar o desembolso previsto em cada uma das etapas operacionais do projeto.

Portanto, as atividades de contenção e manejo na APA das Dunas de Paracuru devem ser executadas de forma coletiva, isto é, com participação dos órgãos públicos de gestão (municipal e estadual), instituições acadêmicas, comunidade local e representantes dos demais segmentos da sociedade civil.

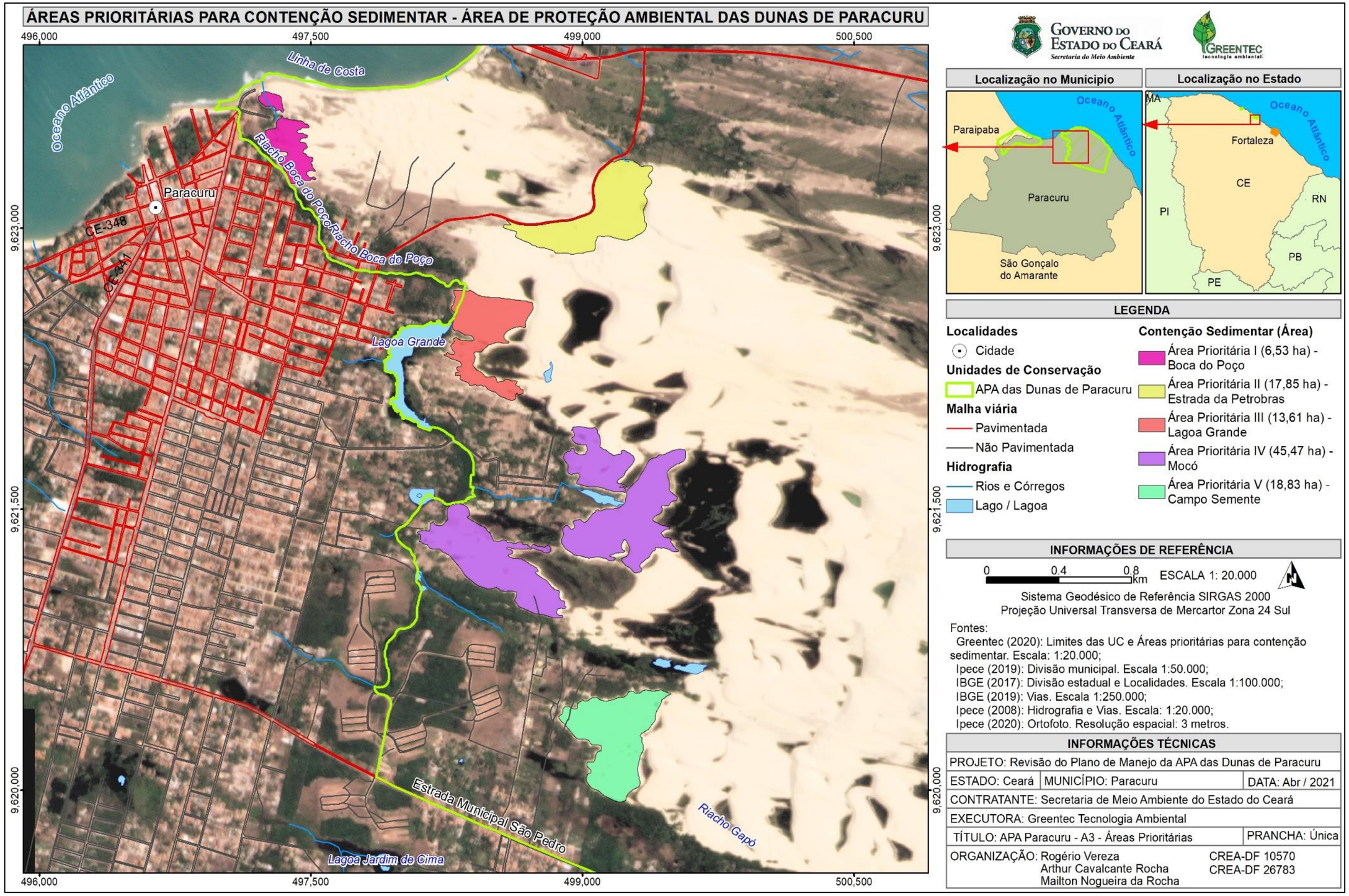
4.2. Definição das áreas prioritárias para contenção do avanço do campo dunar

Do ponto de vista espacial e para fins metodológicos, a delimitação das áreas prioritárias do projeto de contenção na APA das Dunas de Paracuru foi estabelecida com base no mapa de uso e ocupação do solo, apresentado no relatório de diagnóstico do meio físico da UC, no mapa de vulnerabilidade ambiental e no mapa do prognóstico de avanço do campo dunar.

A calibragem das informações foi feita a partir de visitas a campo, onde foram mapeados os limites de contenção por meio de caminhamentos realizados com GPS (Sistema de Posicionamento Global), com auxílio de imagens aéreas obtidas com drone.

Portanto, a definição dos trechos primados para o controle do avanço das dunas em Paracuru tomou como referência as áreas com maior risco de soterramento, localizadas dentro da poligonal de frente de avanço (classificada com grau muito alto de vulnerabilidade ambiental). Com exceção do entorno da Lagoa Grande, as demais áreas caracterizam-se por apresentarem certa densidade demográfica e urbanização, além de dispor de equipamentos de infraestrutura muito importantes, como a estrada que liga a sede municipal ao atracadouro da Petrobras. A figura 24 mostra as poligonais prioritárias para contenção do avanço sedimentar eólico na APA das Dunas de Paracuru.

Figura 24 Áreas prioritárias contenção do avanço dunar na APA das Dunas de Paracuru.



Fonte: Greentec (2021).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, Diná. **Paracuru e sua História: Memórias, Lembranças e Algumas Poesias**. Paracuru: REALCE. 2003, 187p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16661**: Materiais refratários densos conformados - Determinação do volume aparente, volume aparente da parte sólida, densidade de massa aparente, densidade aparente da parte sólida, porosidade aparente e absorção. São Paulo: ABNT, 2017. 5 p.

BARBOSA, L. M. Morfologia e vulnerabilidade ambiental em campos de dunas costeiras ativas do Nordeste do Brasil. VII SINAGEO e II Encontro Latino-Americano de Geomorfologia, VII Simposio Nacional de Geomorfologia e II Encontro Latino-Americano de Geomorfologia , Belo Horizonte , 2008

BOEYINGA, J.; DUSSELJEE, D.W.; POOL, A.D.; SCHOUTENS, P.; VERDUIN, F.; VAN ZWICHT, B.N.M.; KLEIN, A.H.F.. The effects of a bypass dunefield on the stability of a headland bay beach: a case study. **Coastal Engineering**, [S.L.], v. 57, n. 2, p. 152-159, fev. 2010. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.10.002.

BRASIL. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 369, de 28 de março de 2006. **Dispõe Sobre Os Casos Excepcionais, de Utilidade Pública, Interesse Social Ou Baixo Impacto Ambiental, Que Possibilitam A Intervenção Ou Supressão de Vegetação em Área de Preservação Permanente-App**. Brasília, DF, 29 mar. 2006.

CARRIJO, O.A.; LIZ, R.S.; MAKISHIMA, N. Fibra da casca do coco verde como substrato agrícola. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 20, n. 4, p. 533-535, dezembro 2002.

CARVALHO, Alexandre Medeiros; MAIA, Luís Parente; DOMINGUEZ, José Maria Landim. DERIVA E O TRANSPORTE LITORÂNEO DE SEDIMENTOS NO TRECHO ENTRE CUMBUCO E MATÕES – COSTA NOROESTE DO ESTADO DO CEARÁ. **Arq. Ciên. Mar**, Fortaleza, v. 1, n. 40, p. 43-51, jul. 2007.

CASTRO, J. W. A. **Geomorfologia do Sistema Sedimentar Eólico de Paracuru – Ceará** – Tese de Doutorado. UFRJ/PPGG. Rio de Janeiro, 2001.

CASTRO, J.W.A. CALHEIROS, A.L.S. – 2003. GEOINDICADORES RESULTANTES DOS EPISÓDIOS EL NIÑO / LA NIÑA EM DUNAS COSTEIRAS DO LITORAL SETENTRIONAL DO NORDESTE BRASILEIRO. In: **Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário (ABEQUA), IX**, Recife (PE), 12-19/outubro/2003. Anais, CD-ROM (trabalho completo).

CASTRO, João Wagner Alencar. GONÇALVES, Ronaldo Antonio. (2003). O Processo de Soterramento da Cidade de Paracuru - Ceará por Dunas Móveis Transversais Submetidas a Regime de Vento Unimodal. In: **IX Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário (ABEQUA)**., 2003, Recife. Anais do IX Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário (ABEQUA)., 2003. v. p. -.

CASTRO, J. W. A. Transporte Eólico de Sedimentos e Migração de Dunas sobre o Promontório de Paracuru – Litoral Setentrional do Nordeste Brasileiro. **Boletim do Museu Nacional**, N.S., Geol., Rio de Janeiro, 2004 p.1-10.

CEARÁ, Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. **Sistemas Meteorológicos Causadores de Chuva na Região Nordeste do Brasil.** Disponível em:http://www.funceme.br/produtos/script/chuvas/Grafico_chuvas_postos_pluviometricos/entender/entender2.htm. Acesso: 12 ago. de 2020**.**

CEARÁ. Decreto nº 25.418, de 29 de março de 1999. **Dispõe Sobre A Criação da Área de Proteção Ambiental - Apa das Dunas de Paracuru, no Município de Paracuru, e Adota Outras Providências**. Fortaleza, CE, 31 mar. 1999.

CEARÁ. Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME). **Calendário das Chuvas no Estado do Ceará.** 2020b. Disponível em: http://www.funceme.br/app-calendario/ano/municipios/media/2015. Acesso em: 10 jun. 2020.

CEARÁ. Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME). **Gráfico de Chuvas dos Postos Pluviométricos.** 2020a. Disponível em: http://www.funceme.br/?page_id=2702. Acesso em: 15 out. 2020.

CEARÁ. FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS (FUNCEME). **Calendário das Chuvas no Estado do Ceará**. 2020b. Disponível em: http://www3.funceme.br/funceme2.5/index.php/areas/23-monitoramento/meteorol%C3%B3gico/406-chuvas-di%C3%A1rias. Acesso em: 15 out. 2020.

CLAUDINO-SALES, V., WANG, P., & CARVALHO, A. (2018). Interactions between Various Headlands, Beaches, and Dunes along the Coast of Ceará State, Northeast Brazil. **Journal of Coastal Research,** *34*(2), 413-428. Disponível em: http://www.jstor.org/stable/26355554. Acesso: 27 ago. de 2020.

DAMASO, Patrícia de Paula. **Vegetação dunar: caracterização estrutural de dunas do município de Natal-RN como subsídio para implantação de técnicas de reflorestamernto, recuperação e conservação do ecossistema**. 2009. 88 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Prodema - Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/18195. Acesso em: 10 out. 2020.

DAVIES, P.; WILLIANS, A.T. & CURR, R.H.F. Decision making in dune management: theory and practice. **Journal of Coastal Conservation**, n 1, p 87-96. 1995.

EMERIM, Emerilson Gil. **Proposta metodológica para recuperação ambiental de fragmentos de restingas fixadoras de dunas em áreas urbanas**. 2003. 117 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003. Disponível em: http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/84938. Acesso em: 09 out. 2020.

ESRI. (2021) How Maximum Likelihood Classification Works. Disponível em: https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/how-maximum-likelihood-classification-works.htm. Acesso em: 10 jan. de 2021.

FARIAS, Eduardo Guilherme Gentil de; SOUZA, João Marcos Azevedo Correia de. CHEGADA DISPERSIVA DE CAMPOS DE ONDAS Swell NA COSTA

OESTE DO ESTADO CEARÁ – BRASIL. **Arq. Ciên. Mar**, Fortaleza, v. 1, ed. 45, p. 69-74, 2012.

FERNANDEZ, G. B., MUEHE, D. – 2006 – Algumas Considerações sobre o Efeito do Fenômeno El Niño sobre Feições Costeiras ao Longo da Costa Brasileira. **GEO*grafia***, Ano VIII, N.15.

GARCIA-MORA, M.R. *et al*. A Coastal Dune Vulnerability Classification. A Case Study of the SW Iberian Peninsula. **Journal Of Coastal Research**, West Palm Beach, Florida, v. 8, n. 17, p. 802-811, mar. 2001.

GUERRA, Renan Gonçalves Pinheiro et al. MIGRAÇÃO DE DUNAS E O PROCESSO DE SOTERRAMENTO NO LITORAL DE BARROQUINHA, CEARÁ, BRASIL. Arquivos de Ciências do Mar, [S.L.], v. 53, n. , p. 100-109, 20 jan. 2021. Arquivos de Ciências do Mar. http://dx.doi.org/10.32360/acmar.v53iespecial.42660. Disponível em: http://www.periodicos.ufc.br/arquivosdecienciadomar/article/view/42660. Acesso em: 02 abr. 2021.

HIMMELSTOSS, E.A., HENDERSON, R.E., KRATZMANN, M.G., AND FARRIS, A.S., 2018, **Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.0 user guide**: U.S. Geological Survey Open-File Report 2018–1179, 110 p., https://doi.org/10.3133/ofr20181179.

KLEIN, Antonio H.F.; FERREIRA, Óscar; DIAS, Joao M.A.; TESSLER, Moyses G.; SILVEIRA, Lucas F.; BENEDET, Lindino; MENEZES, Joao T. de; ABREU, Jose G.N. de. Morphodynamics of structurally controlled headland-bay beaches in southeastern Brazil: a review. **Coastal Engineering**, [S.L.], v. 57, n. 2, p. 98-111, fev. 2010. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.09.006.

LANCASTER, N., 2009, Aeolian features and processes, *in* Young, R., and Norby, L., Geological Monitoring: Boulder, Colorado, **Geological Society of America**, p. 1–25, doi: 10.1130/2009.monitoring(01).

LEATHERMAN, S.P. 1976. **Quanification of overwash processes: unpubl.** PhD Thesis. University of Virginia, 245 p.

LIMA, I. A. **Um estudo numérico sobre a utilização de telas visando a fixação de dunas e proteção do solo**. 2018. 126 f. Tese (Doutorado em Física) - Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018. Disponível em: http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/34507. Acesso em: 10 out. 2020.

LIMA, José Carlos Rodrigues. **ANÁLISE DA VARIAÇÃO DA LINHA DE COSTA NO LITORAL DO MUNICÍPIO DE PARACURU, CEARA-BRASIL.** 2019. 69 p. Monografia (Curso de Oceanografia) - Graduação, [S. l.], 2019. Disponível em: http://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/50747/2/2019_tcc_jcrlima.pdf. Acesso em: 28 ago. 2020.

LONG, J.W., AND PLANT, N.G., 2012, Extended Kalman Filter framework for forecasting shoreline evolution: Geophysical **Research Letters**, v. 39, no. 13, p. 1–6.

MAGALHÃES, Danilo Carneiro. **EVOLUÇÃO COSTEIRA CONTROLADA POR PROMONTÓRIO NO LITORAL DE PARACURU – CEARÁ**. 2015. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

MAIA, L.P., FREIRE, G.S.S., MORAIS, J.O., RODRIGUES, A.C.B., PESSOA, P.R., MAGALHÃES, S.H.O – 2001 – Dynamics of Coastal Dunes at Ceará State, Northeastern Brazil: dimensions and migration rate. **Arq. Ciên. Mar**, Fortaleza, 34: 11 – 22.

MAIA, L.P.; JIMÉNEZ, J. A.; RAVENTOS, J. S.; MORAIS J. O. – 2000 – Dune Migration and Aeolian Transport Along Ceará State, Brazil: downscaling and upscaling aeolian induced processes. **Arq. Ciên. Mar**, Fortaleza, 33: 99- 106.

MALTA, J. V.; AMARAL, R.F. – 2013 - Experimento de Fluxo de Sedimentos em um Segmento de Campo de Dunas Eólicas Costeiras de Jenipabu - Litoral Oriental do Rio Grande do Norte, Brasil. **Revista da Gestão Costeira Integrada** 13(1):61-78.

MARENGO, Jose A.; CUNHA, Ana P.; ALVES , Lincoln M. A seca de 2012-15 no semiárido do Nordeste do Brasil no contexto histórico. **Climanalise**, [s. l.], ano 2016, v. 4, n. 49, p. 49-54, 15 dez. 2016. Disponível em: file:///C:/Users/mailt/Downloads/marengoetal_new.pdf. Acesso em: 13 out. 2020.

MARQUES, José Matheus da Rocha; MEIRELES, Antônio Jeovah de Andrade. Evolução morfológica e espaçotemporal (2002 –2015) de dunas barcana e barcanóide na planície costeira de Paracuru, Ceará, **Brasil. Revista de Geociências** do Nordeste, Caicó, RN, v. 2, ed. Especial, p. 1299-1309, 2016.

MARTÍNEZ, M. Luisa; GALLEGO-FERNÁNDEZ, Juan B.; GARCÍA-FRANCO, José G.; MOCTEZUMA, Coral; JIMÉNEZ, Claudia D.. Assessment of coastal dune vulnerability to natural and anthropogenic disturbances along the Gulf of Mexico. **Environmental Conservation**, [S.L.], v. 33, n. 2, p. 109-117, 26 maio 2006. Cambridge University Press (CUP). http://dx.doi.org/10.1017/s0376892906002876.

MARTINS, Eduardo Sávio Passos Rodrigues; MAGALHÃES , Antonio Rocha. A seca de 2012-2015 no Nordeste e seus impactos. In: CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (org.). Parcerias Estratégicas. 41. ed. Brasília: CGEE, 2015. v. 20, p. 107-128. Disponível em: http://seer.cgee.org.br/index.php/parcerias_estrategicas/article/viewFile/796/728. Acesso em: 13 out. 2020.

NORDSTROM, K. F. BAUER, B. O. DAVIDSON-ARNOTT, R. G. D. GARES, P. A. CARTER, R., JACKSON, D. W. T. & SHERMAN, D. J. (1996). Offshore Aeolian Transport Across a Beach: Carrick Finn Strand, Ireland. **Journal of Coastal Research**, *12*(3), 664-672. Disponível em: http://www.jstor.org/stable/4298514. Acesso: 27 ago. de 2020.

NORDSTROM, KARL & JACKSON, NANCY & KOROTKY, KATHERINE. (2011). Aeolian Sediment Transport Across Beach Wrack. **Journal of Coastal Research**. 59. 211-217. 10.2307/29783118.

PASSOS, Edson Eduardo Melo. **Agência Embrapa de Informação Tecnológica**. 2010. Disponível em: https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/coco/arvore/CONT000gix1kou302wx5ok05vadr153mgbi6.html#:~:text=Uma%20folha%20madura%20tem%2C%20aproximadamente,An%C3%A3o%20pode%20emitir%2018%20folhas. Acesso em: 10 out. 2020.

PINHEIRO, M.V.A. **Evolução geoambiental e geohistórica das dunas costeiras do município de Fortaleza, Ceará.** Dissertação de Mestrado. UFC, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Fortaleza, 2009. 182p.

PSUTY. NP (2008) The Coastal Foredune: A Morphological Basis for Regional Coastal Dune Development. In: Martínez ML, Psuty NP (eds) **Coastal Dunes. Ecological Studies**, vol 171. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74002-5_2.

ROCHA, Mailton Nogueira da; PINHEIRO, Lidriana de Souza; MORAIS, Jader Onofre de. AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS METEOROLÓGICOS ATUANTES NA MIGRAÇÃO DOS CAMPOS DE DUNAS MÓVEIS SETENTRIONAIS DA PLANÍCIE COSTEIRA DE PARACURU, CEARÁ, BRASIL. **Revista Geociências**, São Paulo, v. 39, n. 2, p. 437-446, jul. 2020. Disponível em: http://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/geociencias/article/view/12676/11698. Acesso em: 20 ago. 2020.

ROSA, Morsyleide de Freitas *et al*. **Utilização da Casca de Coco como Substrato Agrícola**. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2002. 24 p. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/425175/1/doc52.pdf. Acesso em: 10 out. 2020.

ROSEN, P. S., 1978. An Efficient, Low-Cost, Aeolian Sediment Sampling System: **Geological Survey of Canada Paper** 78-1A, p. 531-532.

SHERMAN, DJ E BAUER, BO (1993). Dynamics of beach-dune systems'. **Progress in Physical Geography: Earth and Environment.** 17 (4), pp. 413–447. Disponível em: 10.1177 / 030913339301700402. Acesso: 27 ago. de 2020**.**

SILVA, Graziela Miot da; MOUSAVI, Seyed Mostafa Siadat; JOSE, Felix. Wave-driven sediment transport and beach-dune dynamics in a headland bay beach. **Marine Geology**, [S.L.], v. 323-325, p. 29-46, set. 2012. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.margeo.2012.07.015.

SILVA, Maria Arlene Pessoa da *et al*. Plantas herbáceas fixadoras de dunas - Extremoz - Rio Grande do Norte - Brasil. **Cadernos de Cultura e Ciência**, Cariri, v. 1, n. 1, p. 27-31, nov. 2006. Disponível em: http://periodicos.urca.br/ojs/index.php/cadernos/article/viewFile/48/42. Acesso em: 10 out. 2020.

SILVEIRA, Lucas F.; KLEIN, Antonio H. da F.; TESSLER, Moysés G.. HEADLAND-BAY BEACH PLANFORM STABILITY OF SANTA CATARINA STATE AND OF THE NORTHERN COAST OF SÃO PAULO STATE. **Brazilian Journal Of Oceanography**, São Paulo, v. 2, n. 58, p. 101-122, jul. 2010.

SOUSA, Paulo Henrique Gomes de Oliveira. **Dinâmica ambiental e transformações socioespaciais da orla marítima de Paracuru – Ceará**. 2007. 115 p. Dissertação (Mestrado Acadêmico em Geografia) - Universidade Estadual do Ceará, [S. l.], 2007. Disponível em: http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/DetalheObraForm.do?select_action=&co_obra=104177. Acesso em: 12 ago. 2020.

TABAJARA, L.L.C.A; WESCHEBFELDER, J.. Recuperação de Dunas Frontais em Áreas Degradada por Sangradouro na Praia de Xangri-Lá/RS. **Gravel**, Porto

Alegre, v. 9, n. 1, p. 69-85, dez. 2011. Disponível em: https://www.ufrgs.br/gravel/9/1/Gravel_9_V1_06.pdf. Acesso em: 09 out. 2020.

TABAJARA, Luiz Liberato; MARTINS, Luiz Roberto; FERREIRA, Everaldo Rigelo. Efetividade de Métodos Estruturais na Construção de Dunas Frontais. **Pesquisas em Geociências**, [S.L.], v. 27, n. 1, p. 97-109, 30 jun. 2000. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. http://dx.doi.org/10.22456/1807-9806.20185. Disponível em: https://www.seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/article/view/20185/pdf. Acesso em: 10 out. 2020.

TINLEY, K.F.- 1985 – **Coastal dunes of South Africa**. South African National Scientific Programmes Report 109. Pretoria: Foundation for Research Development, Pretoria.

TRICART J. **Ecodinâmica**. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Superintendência de Recursos Naturais e Meio ambiente. Diretoria Técnica. Rio de Janeiro, 1977, p. 97

YASSO, W. (1965). Plan Geometry of Headland-Bay Beaches. *The Journal of Geology, 73*(5), 702-714. Disponível em: http://www.jstor.org/stable/30079652. Acesso: 27 ago. de 2020**.**